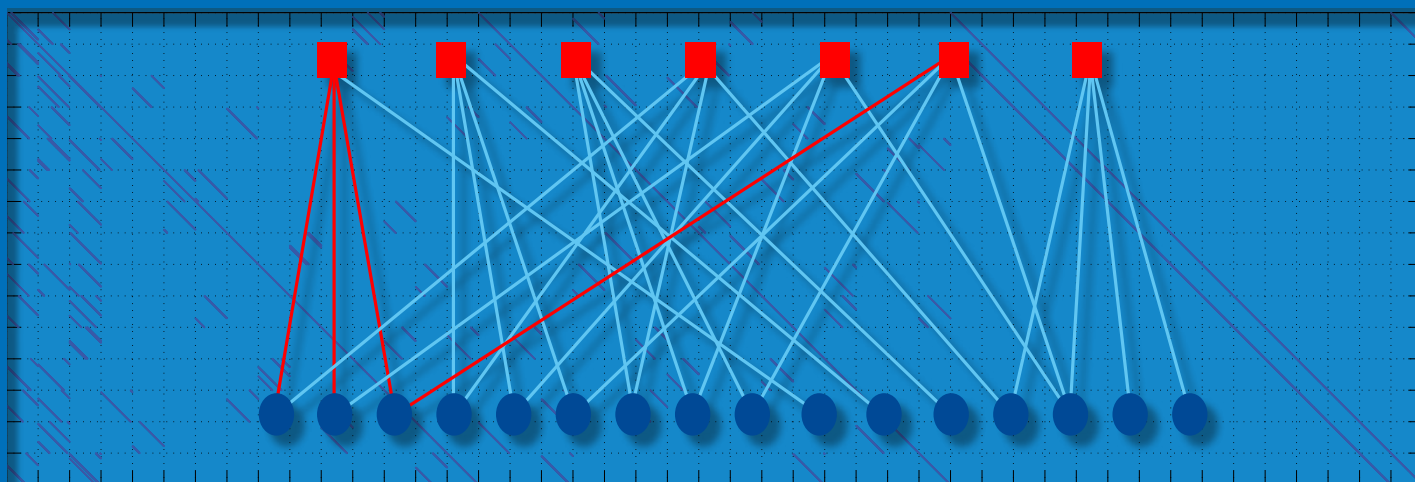
Anno LIX
Numero 2
Agosto 2010

Elettronica e telecomunicazioni

Editoriale

Rivelazione, correzione e mascheramento degli errori - Parte II

L'acustica architettonica - Parte I
Aspetti fisici

Sistemi di diffusione sonora
Gli altoparlanti

Elettronica e telecomunicazioni

La rivista è disponibile su web
alla URL www.crit.rai.it/eletel.htm

Anno LIX
N°2
Agosto 2010

Rivista quadrimestrale a cura della Rai

Indice

Editoriale

Gianfranco **Barbieri**
Direttore di
"Elettronica e Telecomunicazioni"

Riteniamo doveroso aprire questo editoriale rievocando la figura di un amico prematuramente scomparso, con il quale abbiamo condiviso anni di attività negli organismi internazionali in cui si consumava una delle più imponenti rivoluzioni tecnologiche dell'ultimo cinquantennio: l'avvento del digitale e la convergenza delle tecnologie.

Abbiamo conosciuto l'Ing. Silvio Cucchi verso la fine degli anni '80 quando il Centro Ricerche Rai avviò un fecondo rapporto di collaborazione con la Telettra (ora divenuta Alcatel-Lucent) che era allora una delle principali imprese italiane di progettazione e produzione di apparati per telecomunicazioni; erano anni di accese discussioni a livello internazionale sull'approccio da seguire per la definizione di uno Standard unico mondiale per la televisione digitale.

La Rai, tramite il suo Centro Ricerche, era già da anni impegnata nella sperimentazione e nella elaborazione di proposte tecniche; la collaborazione con una azienda manifatturiera nazionale, in continua crescita anche grazie ai significativi investimenti in ricerca e sviluppo ed alla collaborazione con l'università, offriva la carta vincente per poter giocare un ruolo da primi attori sulla scena internazionale.

Venne varato il progetto europeo Eureka 256 nell'ambito il quale fu sviluppato il sistema di codifica digitale della TV ad Alta Definizione basato sull'algoritmo DCT, lo stesso su cui sono basati i vari formati MPEG ampiamente utilizzati nei sistemi multimediali. Su questi temi la nostra rivista ha in diverse occasioni avuto modo di riferire.

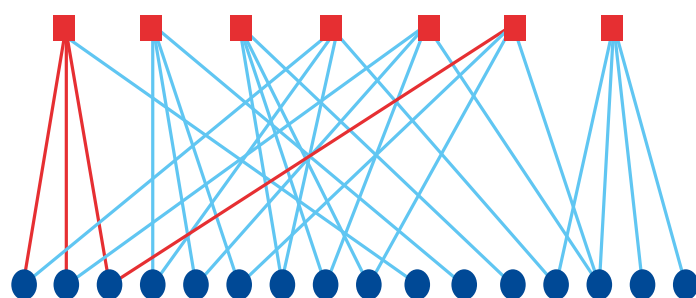
Silvio Cucchi era allora un giovane dirigente Telettra, responsabile della progettazione, e fu grazie alle sue intuizioni ed alla sua straordinaria capacità di tradurre immediatamente le idee in apparati perfettamente funzionanti che i progetti elaborati dal gruppo di lavoro trovavano pratica attuazione. I prototipi di cui coordinò lo sviluppo furono sperimentati per un mese intero in otto sale dislocate sul territorio nazionale e due in Spagna durante i Campionati Mondiali di Calcio del 1990.

Lo ricordiamo come persona di grande valore che, alle eccezionali qualità professionali, univa spiccate doti di umanità e generosità. Non amava mettersi in mostra; sempre animato da un inesauribile entusiasmo per il suo lavoro, si sentiva appagato quando i risultati premiavano la sua determinazione nell'affrontare le più audaci sfide tecnologiche. Con la sua scomparsa l'industria elettronica italiana perde una componente di grande valore umano e professionale.

L'ing. Silvio Cucchi, a sinistra nella foto, riceve uno dei numerosi riconoscimenti internazionali per la sua attività di inventore e progettista.

Che cosa è, come funziona

Rivelazione, Correzione e Mascheramento degli Errori

Parte II

Marzio **Barbero,**
Natasha **Shpuza**

1. Introduzione

La prima parte di questo articolo è stata pubblicata nel numero di aprile 2008 [1], a cui è seguita, nel numero successivo, una ricostruzione storica [2] degli eventi che hanno portato, a partire dalla formulazione della teoria di Shannon, ai recenti sviluppi delle tecniche per la protezione dell'informazione. Tali tecniche sono fondamentali per le prestazioni dei sistemi di telecomunicazione e memorizzazione dei dati sviluppati e standardizzati negli ultimi anni.

Tali articoli evidenziano il ruolo dei codici convoluzionali e codici RS (Reed Solomon) sia nelle comunicazioni spaziali, sia nei sistemi di diffusione televisiva di prima generazione (DVB-S e DVB-T). Il § 2 che segue è dedicata ad una illustrazione della codifica convoluzionale, avendo già trattato i codici RS in [1] § 7.

Si è visto in [2] § 7 che la riscoperta dei codici LDPC, proposti nel lontano 1962 da Robert Gallager, è alla base delle prestazioni dei sistemi utilizzati per le missioni spaziali del futuro e dei sistemi di diffusione televisiva di seconda generazione (DVB-S2, DVB-T2 e DVB-C2). Le prestazioni di questi sistemi raggiungono il limite teorico di Shannon ([2] § 2). A questi codici è dedicata il § 4 dell'articolo.

Sommario
Questa è l'ultima parte di un trittico di articoli, di cui i primi due sono stati pubblicati nei numeri di aprile e agosto del 2008. Lo scopo è quello di fornire informazioni di base utili alla comprensione delle tecniche utilizzate per proteggere i dati dagli errori introdotti dai canali di trasmissione o dai sistemi di memorizzazione e registrazione. Tali tecniche sono alla base dei sistemi di diffusione televisiva, in particolare gli standard DVB. In questo articolo conclusivo sono considerati i codici di tipo convoluzionale, utilizzati nella prima generazione DVB, e i codici LDPC, adottati nella seconda generazione. Questi codici trovano ora applicazione anche per migliorare le prestazioni dei servizi di downloading e streaming basati su protocollo IP e per incrementarne le prestazioni in termini di capacità dei sistemi di memorizzazione (hard-disk).

2. Codifica convoluzionale

La codifica convoluzionale e la codifica a blocchi costituiscono le due forme principali di FEC. Essi differiscono fra loro poiché i codici convoluzionali non spezzano il flusso di dati da codificare in blocchi di lunghezza fissa, bensì la ridondanza è aggiunta in modo continuo al flusso codificato.

Si è visto in [2] che la codifica convoluzionale ha trovato impiego sin dalle prime missioni spaziali, grazie alla semplicità costruttiva del codificatore, realizzabile grazie a pochi flip-flop e alcune porte logiche.

In figura 1 è rappresentato, come esempio, il "miglior" codice con *rate* R=1/2 e L=3.

Il *code rate* R e la *constraint length* L sono i due parametri principali che caratterizzano il codice. Nella codifica convoluzionale si opera sul flusso binario seriale: R è il rapporto k/n dove n è il numero di bit in uscita dal codificatore in corrispondenza di k bit di informazione in ingresso. I bit in uscita sono generati in funzione dei k bit in ingresso e dei precedenti L-1 blocchi di k bit, per cui si ha memoria del flusso di dati già codificato. Un ulteriore parametro che caratterizza il codice è la distanza libera d_{free} (*free distance*), la distanza di Hamming minima fra differenti sequenze codificate.

Acronimi e sigle	
3GPP	3rd Generation Partnership Project
BCH	Bose, Chaudhuri, Hocquenghem (codice)
DTMB	Digital Terrestrial Multimedia Broadcast
DVB	Digital Video Broadcasting, (www.dvb.org)
-RCS	Return Channel via Satellite
FEC	Forward Error Correction
FLUTE	File Delivery over Unidirectional Transport
G.hn	home network
IRA	Irregular Repeat Accumulate
LDPC	Low-Density Parity-Check
LT	Luby Transform (codice)
MBMS	Multimedia Broadcast/Multicast Services
MPEG	Motion Picture Expert Group
RAPTOR	RAPid TORnado
RS	Reed Solomon (codice)
SISO	Soft-In-Soft-Out
SoC	System on Chip
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System

Fig. 1 - Il codificatore nello schema è composto da due componenti elementari: flip-flop e sommatori binari (XOR). E' caratterizzato da un *code rate* R=1/2, quindi il numero di bit in uscita è il doppio di quelli entranti. Il flusso in ingresso è applicato al registro a scorrimento che dispone di uscite intermedie (prese) in corrispondenza di ciascun stadio; ad ogni bit in arrivo all'ingresso, il flusso avanza di un colpo di clock e l'uscita è ottenuta prelevando alternativamente i bit ottenuti alle due uscite 1 e 2; il bit-rate in uscita è quindi doppio rispetto a quello in ingresso. La *constraint length* L corrisponde al numero di prese e la presenza o meno delle connessioni alle uscite dei flip-flop corrispondono ai polinomi generatori del codice G_1=101 (cioè manca la presa intermedia) e G_2=111 (l'uscita 2 dipende dai tre bit presenti nello shift). I polinomi generatori sono generalmente espressi in ottale e quindi questo codice è noto come L=3 (5,7), d_{free}=5.

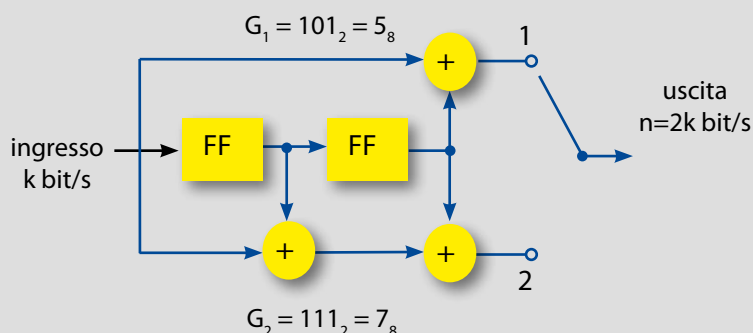
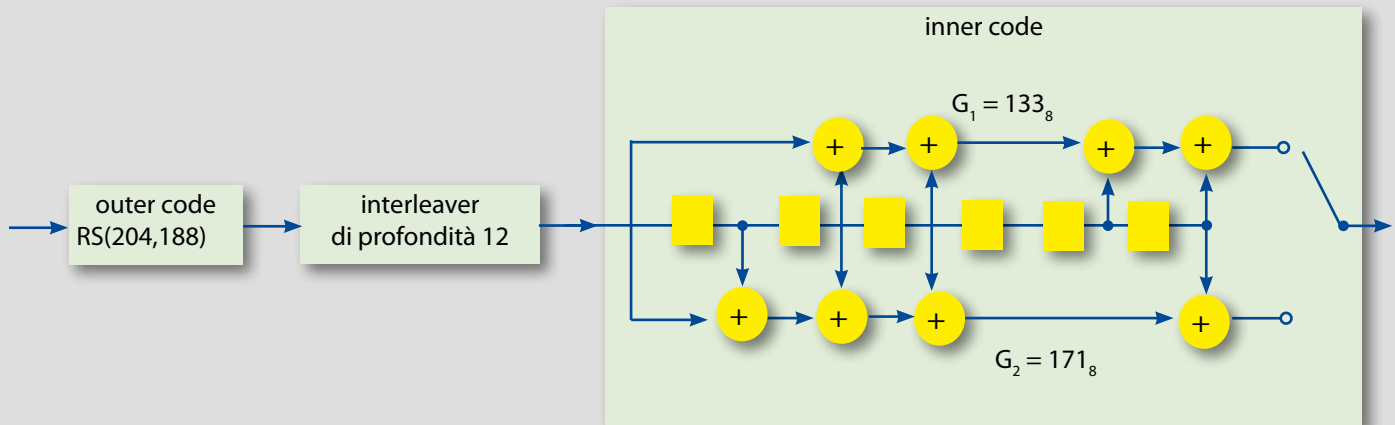



Fig. 2 - Nel sistema DVB-S lo schema del trasmettitore prevede un codice esterno accorciato RS (204,188), seguito da un interleaver con profondità 12 e dal codice interno, convoluzionale con code rate R=1/2, *constraint length* L=7, polinomi generatori G_1=171_8 e G_2=133_8, d_{free}=10.

La struttura di un codificatore di questo tipo corrisponde a quella di una macchina a stati finiti. Il numero di stati cresce esponenzialmente con il crescere di L: per valori piccoli di L nella decodifica è utilizzato l'algoritmo di Viterbi ([2] § 4), che presenta il vantaggio di richiedere un tempo fisso per la decodifica. In pratica si confronta una sequenza piuttosto lunga di bit ricevuti con tutte le possibili sequenze e si sceglie quella più prossima (criterio di massima verisimiglianza), ricavando da essa k bit ogni n bit ricevuti.

La decodifica introduce un ritardo, proporzionale alla sequenza esaminata, e una decisione errata può influenzare anche le successive decisioni: si può avere propagazione degli errori ed in tal caso gli errori si presentano a burst.

Per limitare gli effetti dei burst di errori si può ricorrere alla tecnica di due codici posti in cascata, un codice esterno seguito da un codice interno, così come si è visto parlando dei codici prodotto. In questo caso però si utilizza il termine codici concatenati (*concatenated codes*) per indicare questa tecnica.

Lo schema adottato per le comunicazioni spaziali a partire dal 1977 era basato su il codice convoluzionale R=1/2 e L=7 come codice interno, da simboli costituiti da byte protetti da un codice esterno RS(255,233,33), in grado di correggere fino a 16 byte errati.

Anche nel caso del sistema di diffusione da satellite di prima generazione, il DVB-S, è stato adottato uno schema analogo (figura 2), basato su un codice convoluzionale R=1/2 e L=7. In questo caso si adotta un RS accorciato RS(204,188) derivato dal RS(255,239) e in grado di correggere fino a 8 byte errati o 16 byte nel caso di *erasure* ([1], § 7.3).

Per ridurre gli effetti dei burst di errori è utilizzata la tecnica dell'interleaving ([1], § 6). Lo schema di interleaving (usato in trasmissione) e de-interleaving (utilizzato in ricezione) convoluzionale è quello di figura 3.

La codifica convoluzionale permette la ricezione in caso di canali particolarmente rumorosi, ma richiede un'elevata ridondanza. Con R=1/2, metà della capacità del canale è utilizzata per la ridondanza.

Si può ridurre tale ridondanza, per sfruttare maggiormente la capacità per trasmettere i dati utili, se le caratteristiche del canale lo consentono e se si può accettare una riduzione di d_{free} e la conseguente minore robustezza.

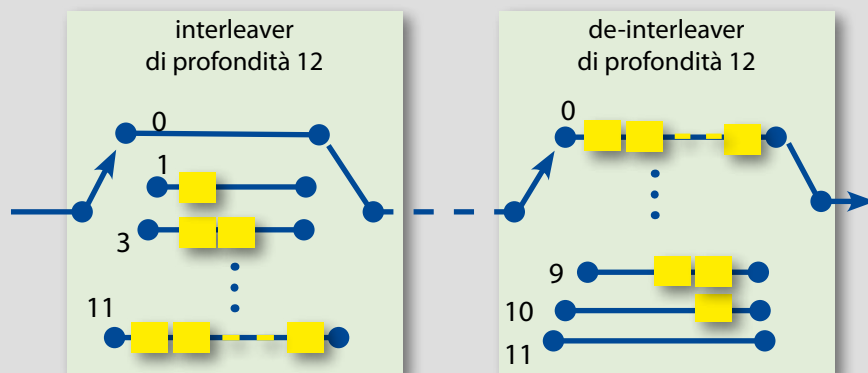



Fig. 3 - Nel sistema DVB-S l'interleaver consiste in 12 rami, ciclicamente interconnessi al flusso di byte in ingresso: ciascun ramo j è costituito da uno shift register (FIFO) di Mj celle. Il valore di M è pari a 17, rapporto fra il numero di byte costituenti il codice (204) e la profondità di interleaving (12). Al ramo 0 non corrisponde alcun registro a scorrimento, e quindi il ritardo introdotto è nullo, al ramo j=11 corrisponde un registro di 17*11=187 byte. Il de-interleaver ha una struttura analoga, ma l'indice j=0 corrisponde al ritardo massimo (187 byte) e quello 11 al ritardo nullo.

A tale scopo si utilizza la tecnica di *puncturing*, cioè si "perfora" il flusso di dati avviati al modulatore, ovvero si eliminano alcuni dei bit in base ad una opportuna matrice (tabella 1). In fase di decodifica è noto il valore di code rate *R* utilizzato dal codificatore: tanto più è prossimo a 1, tanto più bassa è la ridondanza e meno robusto il codice. Il valore di *R* può essere variato nel tempo in funzione delle caratteristiche dal canale; si consideri ad esempio il caso di una sonda spaziale che si allontana dalla terra: al diminuire dalla potenza ricevuta, si accetta una riduzione della velocità dei dati ricevuti, pur di continuare l'acquisizione delle preziose informazioni raccolte.

3. I Turbo Codici

Nei primi anni '90 l'uso dei codici a blocco di tipo RS e di quelli convoluzionali distavano ancora da quelle teoricamente raggiungibili (limite di Shannon) di più di 3dB, ovvero gli schemi di codifica praticamente realizzabili allora richiedevano che i sistemi di comunicazione dovessero utilizzare, a parità di prestazioni, un'energia almeno doppia della minima teorica.

Nel 1993 due ingegneri elettronici francesi, Claude Berrou e Alain Glavieux, proposero uno schema di codifica che consentiva un miglioramento tale da approssimarsi al limite di circa 0,7 dB.

Questi codici vennero denominati Turbo Codici perché nella decodifica si utilizza un percorso di retroazione, analogamente a quanto avviene in campo automobilistico con i motori turbo.

Tab. 1 - Matrici di perforazione usate per le telecomunicazioni satellitari e specificate per lo standard DVB-S. Se, ad esempio, si vuole utilizzare il codificatore di figura 1 con un *code rate R*=2/3, si invieranno solo i bit in posizione pari in uscita dal ramo superiore e tutti i bit in uscita dal ramo inferiore.

R	1/2	2/3	3/4	5/6	7/8
puncturing matrix	1 1	10 11	101 110	10101 11010	1000101 1111010
d_{free}	10	6	5	4	3

Un turbo codice è formato dalla concatenazione parallela di due codici separati da un interleaver.

In figura 4, a titolo di esempio, è riportato lo schema del codificatore turbo utilizzato per il sistema di telefonia mobile di terza generazione UMTS.

In generale la scelta dei codificatori e dell'interleaver è libera, ma la maggior parte delle realizzazioni si basa sui criteri adottati per quello in figura: i due codificatori sono identici; il codice è sistematico, ovvero i bit in ingresso sono anche presenti all'uscita; l'interleaver legge i bit in ordine pseudo-casuale.

La scelta dell'interleaver è fondamentale per il progetto dello schema di un turbo codice. L'interleaver pseudo casuale o pseudo-random è definito da un generatore di numeri pseudo casuali o da una look-up table.

Ha due scopi fondamentali. Essendo posto all'ingresso del secondo encoder, la sua uscita ha caratteristiche statistiche completamente diverse dall'uscita del primo encoder, in particolare per quanto riguarda il peso, cioè il numero di 1 presenti. L'uso dell'interleaving pseudocasuale all'ingresso del secondo encoder rende i due flussi ottenuti completamente scorrelati, anche in uscita dai due decoder corrispondenti, e ciò è particolarmente vantaggioso in fase di decodifica.

Fondamentale per ottenere prestazioni ottimali è l'impiego di un metodo *soft -decision* per la decodifica. In un decoder *SISO* la decisione non è basata su una soglia (*hard-decision*) per decidere se il simbolo ricevuto è 0 oppure 1, ma il decoder elabora un valore reale (*soft*) ottenuto dal demodulatore e fornisce in uscita per ciascun bit una stima della probabilità che il bit trasmesso sia un 1.

Nel decoder turbo, le uscite dei due decoder forniscono stime degli stessi bit, ma i bit sono trasmessi in sequenze differenti e ciò permette di trarre un significativo guadagno dalla comparazione delle due informazioni, dopo una appropriata riorganizzazione dei dati stimati.

Un ulteriore guadagno è ottenuto reiterando le stime più volte, usando alternativamente i valori stimati dai due decoder, fino a quando viene deciso in modo definitivo (*hard*) se al bit ricevuto è assegnato il valore 0 oppure 1.

I turbo codici sono utilizzati, oltre che nel sistema UMTS, dallo standard DVB-RCS.

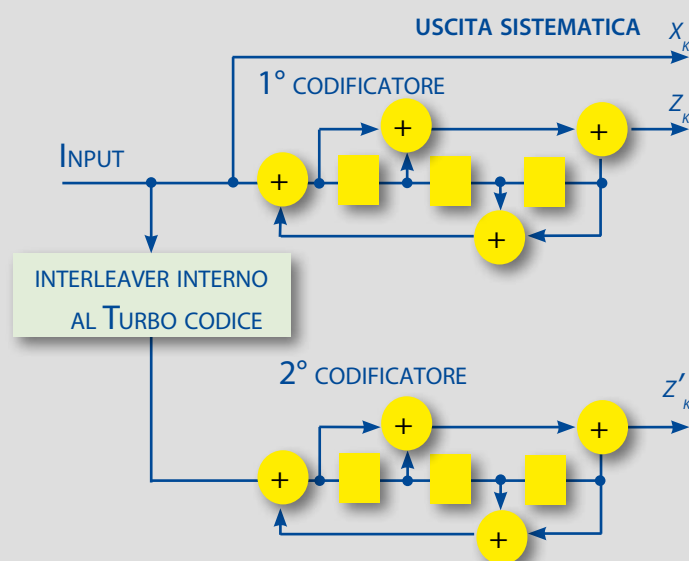



Fig. 4 - Codificatore utilizzato per i sistemi UMTS: segue i criteri di progetto indicati nel documento originale di Berrou e Glavieux del 1993 e utilizza una coppia di semplici codificatori convoluzionali identici. Per ogni bit in ingresso x_k vengono generati un bit x_k (il codice è sistematico) e due bit di parità z_k e z'_k: il code rate R è 1/3.

4. I codici LDPC

Con la scoperta dei Turbo Codici si avviò una rivalutazione degli schemi di codifica proposti nel passato, caratterizzati da una ridotta complessità, sfruttatabile per realizzare schemi di decodifica iterativi. Nell'ambito di tale analisi degli schemi precedentemente trascurati fu ripreso il lavoro iniziato con la tesi di dottorato di Robert Gallager nel 1962, sui codici LDPC.

In quanto codici lineari a blocco, i codici LDPC possono essere rappresentati mediante matrici (si veda come esempio il codice di Hamming [1] § 4): la matrice per il calcolo dei bit di parità H e la matrice generatrice G. Per migliorare l'efficienza del codice, la matrice H deve essere costruita in modo che la distanza minima sia la più grande possibile: ciò implica che la matrice sia "sparsa", ovvero gli 1 siano in numero ridotto rispetto agli 0, da qui la denominazione di codice LDPC, cioè a bassa densità dei bit di parità. La matrice H è caratterizzata da n colonne e da n-k righe, dove k sono i bit di parità.

Se il numero di 1 presenti sulle colonne è costante e se il numero di 1 presenti sulle righe è costante il codice LDPC si dice regolare, altrimenti è detto irregolare. In figura 5 è un esempio molto semplice di codice LDPC con una matrice H (20,15).

Fig. 5 - L'esempio proposto da Gallager nel 1963. E' basato su una matrice H (*parity check matrix*) costituita da 20 colonne e 15 righe caratterizzata da avere 4 elementi a 1 per ciascuna riga e tre elementi a 1 per ciascuna colonna.

I codici LDPC hanno il vantaggio di offrire prestazioni prossime a quelle teoriche (limite di Shannon), di essere adatti a differenti tipi di canale e di richiedere tempi di decodifica che crescono linearmente con le dimensioni del blocco. Inoltre sono realizzabili schemi che permettono un elevato grado di parallelismo sia in fase di codifica che di decodifica.

Sono stati proposti diversi algoritmi per costruire matrici H, anche utilizzando schemi di generazione pseudo casuali. Non è un problema complesso quello di generare codici LDPC con buone prestazioni e quelli con prestazioni migliori sono di tipo irregolare. La difficoltà di progettazione consiste nel mantenere bassa la complessità del codificatore e del decodificatore.

Fig. 6 - In pratica la matrice H deve essere di grandi dimensioni ed è importante definire la sua struttura in modo da minimizzare la complessità del codificatore e del decodificatore, anche in termini di memoria per rappresentarla. Nell'esempio la disposizione degli 1, rappresentati dalle linee diagonali, è tale da consente un risparmio di memoria e la possibilità di individuare una struttura in sottomatrici. Questa matrice è costituita da 16200 colonne e 5400 righe ed è adottata nei sistemi DVB di seconda generazione.

Infatti le prestazioni dei codici migliorano al crescere delle dimensioni del blocco, come già era stato evidenziato da Elias nel 1955. I codici LDPC possono avere prestazioni migliori dei Turbo Codici quando la lunghezza del blocco è elevata, dell'ordine di alcune decine di migliaia di bit (figura 6)

Una rappresentazione alternativa del codice è quella grafica, introdotta da Tanner (figura 7). Se la matrice H è scelta senza alcuna restrizione, le connessioni, rappresentabili con il grafico di Tanner, appaiono a distribuite a caso e l'accesso alle n connessioni implica n cicli di clock. E' quindi vantaggioso adottare strutture di H tali da consentire una parallelizzazione parziale, in modo che un certo numero di nodi venga processato in parallelo.

Così come per i Turbo codici, anche per quelli LDPC il guadagno in termini di prestazioni è ottenuto grazie alla decodifica iterativa. Il numero di iterazioni è elevato (almeno 30) e il numero di calcoli, seppur semplici, per ciascuna iterazione è proporzionale alle dimensioni della matrice, pertanto la complessità totale della decodifica è superiore a quella richiesta per i Turbo Codici. Al crescere del numero di iterazioni, cresce la quantità di memoria necessaria e si incrementa la latenza (il ritardo nella decodifica).

Anche nel caso dei codici LDPC le realizzazioni pratiche utilizzano la decodifica *soft*, che consente una più rapida convergenza dell'algoritmo di decodifica.

I codici LDPC sono stati adottati per la prima volta in uno standard dal gruppo DVB-S2 [3]. Lo schema scelto per il sistema di diffusione via satellite di seconda generazione DVB-S2, è stato successivamente adottato per il DVB-T2 per il terrestre [4] e DVB-C2 per la distribuzione via cavo

La struttura prescelta è basata sulla concatenazione di due codici: un BCH come codice esterno e un LDPC come codice interno.

Il codice LDPC utilizzato dal DVB è denominato *Extendet IRA code*, ha il vantaggio di una ridotta (lineare) complessità del codificatore. La lunghezza di parola può essere n=64800 (per le trame normali) o n=16200 (per le trame corte). Per comprendere

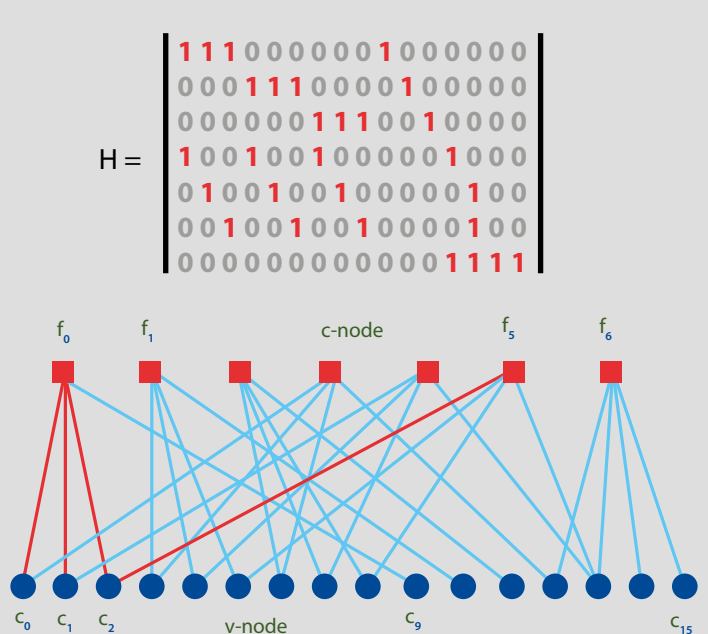



Fig. 7 - Nella rappresentazione proposta da Tanner il codice è descritto da un grafico bipartito.
Consiste di due tipi di nodi: i v-node e i c-node.
I v-node (*variable-node*) sono di solito indicati con la lettera *c* e sono in numero pari al numero di bit che costituiscono la parola di codice, ovvero *n*, quante le colonne della matrice H. I c-node (*check node*) sono indicati con la lettera *f* e sono tanti quante le righe di H, ovvero *n-k*. Il c-node f_i è connesso con il v-node c_j solo se l'elemento h_{ij} della matrice H è pari a 1.
L'algoritmo di decodifica prevede che ciascun nodo *f* riceva i contributi dai nodi *c* ad esso collegati e determini i valori di parità ritenuti corretti. Il calcolo può essere *hard*, semplice XOR dei contributi, oppure di tipo *soft*. Nel passo successivo tali valori sono inviati ai nodi *c*, e per ciascuno di essi è determinato, in base al valore precedente e ai contributi dei nodi *f* connessi, il nuovo valore di *c*.
Il processo è iterativo, ha termine quando non vi sono più variazioni nei valori di *c*, e quindi la parola di codice calcolata è ritenuta corretta, oppure quando si raggiunge il numero massimo previsto di iterazioni.
Una scelta opportuna della disposizione degli 1 nella matrice H, e quindi dei collegamenti fra i nodi del grafico, consente di effettuare i calcoli in parallelo, diminuendo il tempo di latenza dovuto alla decodifica.
Nell'esempio riportato, la matrice H in alto e il grafico di Tanner in basso corrispondono allo stesso codice, molto semplice. Il nodo f_0 è calcolato in base ai contributi c_0, c_1, c_2 e c_9 e, nel passo successivo, contribuisce, insieme a f_5, a determinare il nuovo valore di c_2...

la complessità di decodifica, si consideri che, con la lunghezza di 64800 bit, ad ogni iterazione è necessario accedere e calcolare circa 300000 dati e il numero di iterazioni per garantire le prestazioni è pari a 30.

Per ridurre la complessità e la latenza nelle fasi di codifica e decodifica, i codici LDPC adottati dai sistemi DVB di seconda generazione sono caratterizzati da "matrici di parità" H sparse, disposte in modo da consentire l'individuazioni di sottomatrici, su cui operare in parallelo (figura 6).

L'uso dei codici LDPC permette un'elevata flessibilità nella scelta del *code rate,* infatti *R* può assumere per il DVB/S2 i valori 1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, e 9/10; mentre nel caso del DVB/T2 i valori possibili sono 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6.

Altri standard che utilizzano questi codici sono le nuove versioni di WiMax mobile e WiFi. Anche il sistema di televisione terrestre DTMB della Repubblica Popolare Cinese adotta uno schema basato su BCH e LDPC, con una lunghezza di 7488 bit.

5. Mascheramento

Nella prima parte [1] si è visto che l'adozione dei codici serve a rivelare la presenza degli errori e, normalmente, a correggerli riducendo la probabilità di errore residua a valori tali da rendere non percepibili o accettabili gli effetti dovuti agli errori non corretti.

In [1] § 5 si è accennato agli effetti del superamento della capacità correttiva del codice: in ricezione si passa da una condizione ottimale, in cui tutti gli errori sono corretti, ad una condizione in cui, anziché recuperare integralmente l'informazione, vengono introdotti ulteriori errori e si perviene rapidamente ad una condizione di non funzionamento, di non-servizio.

Nel caso in cui il servizio lo consenta, si richiede la ritrasmissione dell'insieme di dati non ricevuti correttamente: ciò è possibile se è disponibile un canale di ritorno e se i dati possono essere ritrasmessi, ad esempio nel caso in cui si tratti di file di dati prodotti da un server. Oppure si attende una nuova ricezione degli stessi dati, nel caso di ritrasmisisone ciclica, come avviene per alcuni servizi quali il Televideo, esempio riportato in [1].

Nel caso della diffusione di informazioni audio e video, in broadcasting o streaming, si può invece sfruttare la ridondanza residua, ancora presente nell'informazione ricevuta anche quando siano state utilizzate efficienti tecniche di compressione e codifica.

Le strategie di correzione e di interleaving consentono non solo di ridurre, grazie ad esempio alla concatenazione di codici, il numero di errori residui, cioè quelli che superano le capacità correttive del codice, ma anche di fornire una valutazione dell'attendibilità dei dati, in particolare se si adottano tecniche di decisione *soft*, al fine di segnalarla allo stadio di decodifica successivo.

Al momento in cui si estraggono dai dati associati al flusso binario le informazioni relative ai pixel d'immagine o ai campioni audio, è quindi nota l'affidabilità di tali informazioni e, se è elevata la probabilità che siano erronee, è possibile ricorrere alla tecnica del mascheramento (*concealment*).

Ad esempio, nel caso del segnale video, è possibile utilizzare la correlazione con i pixel contigui o fra blocchi e macroblocchi (nel caso di codifica MPEG) contigui nel tempo (appartenenti ai quadri precedenti o successivi) e ricostruire l'informazione mancante con pixel, blocchi o macroblocchi stimati a partire da quelli presenti in memoria e ritenuti corretti. Nel caso di perdita di gran parte dell'informazione (ad esempio in presenza di fading o rumore impulsivo) il mascheramento avviene congelando l'intera immagine presente in memoria, fino a quando la decodifica riprende correttamente.

Le tecniche di mascheramento di solito danno origine a difetti percepibili dall'utente, ma meno fastidiosi rispetto all'interruzione completa del servizio o alla visualizzazione di porzioni di immagine completamente scorrelate.

6. Cancellazioni (erasure)

Una sempre maggior mole di traffico dati si attua sulla rete Internet. Il protocollo internet (IP) prevede l'organizzazione dei dati in pacchetti dotati di una intestazione (*header*) che racchiude l'indirizzo la sorgente e la destinazione del pacchetto e spesso anche un numero che ne indica la posizione assoluta o relativa all'interno della sequenza che compone il flusso (*stream*) di dati. I pacchetti vengono instradati, seguendo i percorsi ritenuti più opportuni, attraverso la rete fino a raggiungere la destinazione. A volte, per le ragioni più varie (ad esempio *overflow* dei *buffer* presenti nei *router* intermedi), alcuni dei pacchetti non raggiungono la destinazione oppure i pacchetti ricevuti non vengono considerati validi, perché sono rivelati errori non correggibili.

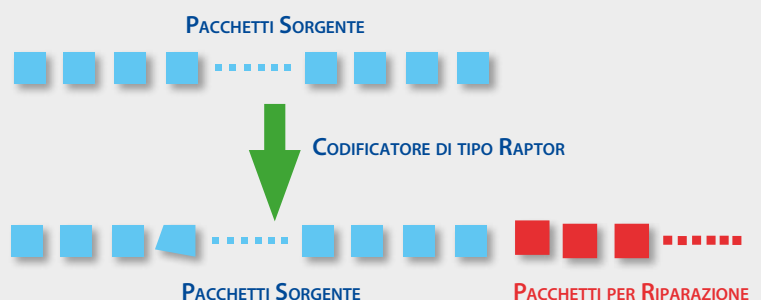
In questi casi si potrebbe procedere con la richiesta di ritrasmissione dei pacchetti mancanti, cioè cancellati (*erasure*), ma di fatto tale approccio può risultare non praticabile a causa della distanza fra il ricevitore e la sorgente (e quindi del tempo di latenza), della complessità o tipologia della rete (canali *wireless* o via satellite) o dal tipo di sorgente (un server che deve servire contemporaneamente più utenze e quindi non è in grado di gestire le richieste di ritrasmissione).

I *fountain code* sono codici che offrono una soluzione: la sorgente invia l'informazione in modo ridondante, tale da consentire la sua ricostruzione anche da parte del ricevitore soggetto ad un numero di erasure non superiore a quello massimo prevedibile (*worst case*). Il nome *fountain* è rappresentativo del concetto della fontana (la sorgente) che riempie il bicchiere (il ricevitore) anche nel caso in cui parte dell'acqua (i pacchetti dati) prodotti dalla fontana va persa.

Il *fountain code* produce, a partire da k simboli, un flusso teoricamente illimitato di simboli; il decodificatore è in grado di recuperare i k simboli a partire da un insieme di n simboli ricevuti; il codice ha buone prestazioni se n è prossimo a k, e se il tempo di decodifica è direttamente proporzionale a k. Il simbolo è, genericamente, un vettore di bit, ad esempio un pacchetto dati.

I codici LT sono stata la prima classe di *fountain code* utilizzabile in pratica. I *Raptor code* [5] sono una delle classi di *fountain code* caratterizzati da un tempo di codifica e decodifica lineare rispetto a k. Questi codici hanno due stadi di codifica: un *pre-code* o *outer-code* e un *inner-code*. Il *pre-code* può, a sua volta, essere la concatenazione di due codici, ad esempio un codice di Hamming e un LDPC. Il codice interno è un codice LT.

Alcuni dei più recenti standard quali il MBMS nell'ambito del 3GPP per la telefonia mobile di terza generazione e DVB-H [6] e DVB-SH per il datacast verso i dispositivi mobili adottano il protocollo FLUTE che prevede, opzionalmente, l'uso dei codici *Raptor*.

Fig. 8 - I dati che costituiscono i file da trasmettere sono generalmente protetti da FEC, a livello fisico. Il file è organizzato in un numero fisso di *source symbol*; a livello applicazione il codificatore *Raptor* genera, oltre ai *source symbol*, un numero di *repair symbol* variabile in funzione del numero di *erasure* previsti nelle condizioni peggiori, cioè di pacchetti che si ritiene probabile vadano persi. Se è disponibile un canale di ritorno, si possono anche prevedere servizi in cui vengano generati, su richiesta, ulteriori *repair symbol*, destinati agli utenti che non sono stati in grado di ricostruire l'intera informazione. Lo scopo è quello di adattare la banda utilizzata, minimizzando quella necessaria a contrastare le *erasure* e riducendo al minimo la latenza, almeno per gli utenti che godono di migliori condizioni di ricezione.

I codici *Raptor* previsti in FLUTE *sono* di tipo sistematico, cioè i simboli del messaggio originale sono compresi fra quelli ricevuti. Si prevede la mappatura dei file in simboli denominati simboli sorgente (*source symbol*) e la generazione di simboli aggiuntivi utilizzati per la riparazione (*repair symbol*) una appropriata strategia basata sull'adozione di codici per la correzione degli errori consente di minimizzare sia l'effetto della perdita di pacchetti sia l'occupazione di banda (figura 8).

7. Oltre il limite?

Nel mese di luglio è stato diffuso un comunicato stampa su un nuovo dispositivo SoC basato su LDPC per gestire la memorizzazione dei dati su hard-disk. In particolare esso trova applicazione per i dischi da 2,5 pollici, il segmento a crescita più veloce nel mercato degli hard-disk, portando la capacità a 320 GB e quindi consentendo di continuare l'andamento nella crescita di capacità di memorizzazione, che raddoppia ogni 18 mesi.

Rappresenta l'ultimo progresso, in ordine di tempo, che possiamo attribuire al contributo essenziale delle tecniche di protezione degli errori.

Gli articoli che compongono questo trittico illustrano una storia, quella che ha portato alle prestazioni finali dei sistemi attuali. Le tappe principali di questa storia sono riassunte in figura 9.

Abbiamo visto in [2] che è una storia che ha un inizio ben definito, temporalmente: coincide con la la pubblicazione dell'articolo di Shannon nel 1948. Fin dall'inizio la storia introduce due dei principali protagonisti e indica il possibile lieto fine. I protagonisti sono lo stesso C. E. Shannon, e R.W. Hamming, il cui codice è citato in tale articolo come esempio di codice "efficiente". E il lieto fine è costituito dal raggiungimento del limite di Shannon.

Negli anni '50, il computer, appena nato, è il primo campo di applicazione. Hamming inventa il codice proprio per rendere possibile il funzionamento del computer, che altrimenti, a causa degli errori, si blocca in continuazione. Il codice RS (Reed -Solomon) è del 1960; Reed raggiunge la notorietà per aver realizzato un computer compatto, delle dimensioni di una scrivania.

Negli anni '60 e '70, l'attenzione si focalizza sulle comunicazioni spaziali; il Jet Propulsion Laboratory e la NASA diventano il punto di aggregazione degli esperti che collaborano per mettere a punto i sistemi che consentano l'acquisizione delle informazioni raccolte dalle missioni spaziali. Protagonisti sono A.J. Viterbi e I.S. Reed. Il codice Reed-Muller, l'algoritmo di Viterbi per la decodifica dei codici convoluzionali e infine i codici concatenati RS e convoluzionali con decodifica di Viterbi sono le tappe che permettono l'esplorazione dei pianeti del sistema solare a partire dal 1969 fino alla fine del secondo millennio.

Tornando al campo della memorizzazione: gli schemi basati su codici prodotto RS trovano un ampia diffusione sia per la registrazione su supporto magnetico (disco o nastro) che su disco ottico. Sia il CD (1982) che il DVD (1996) lo adottano.

E lo schema che consente le esplorazioni spaziali è anche alla base dei sistemi di diffusione televisiva digitale. Lo schema RS-interleaving-codice convoluzionale-decodifica di Viterbi è adottato per la prima trasmissione digitale sperimentale via satellite delle immagini in alta definizione durante i campionati mondiali di Italia '90 e successivamente dal DVB-S (1994), il sistema di diffusione televisiva via satellite, normalizzato dal gruppo presieduto da Mario Cominetti, del Centro Ricerche Rai.

Il codice RS all'inizio degli anni '90 è il protagonista assoluto nei tre campi (memorizzazione, comunicazioni spaziali, diffusione televisiva digitale) e sembra che i 3 dB che separano dal lieto fine, il raggiungimento del limite di Shannon, siano un ostacolo insormontabile, quando i Turbo codici, "inventati" nel 1993, rendono il limite a portata di mano.

Sono trascorsi pochi anni, necessari perché la novità venisse recepita da alcuni standard di telecomunicazioni (DVB-RCS, HSPA per la telefonia e WiMax), quando il gruppo che si occupa del successore del sistema di diffusione televisiva via satellite, il DVB-

LDPC
2010
DVB-C2
HOME NETWORK
DVB-T2
WiFi
Ethernet
DVB-S2
WiMAX
MRO
Raptor code
LDPC (DVB-S2)
Turbo
UMTS
2000
DVB-RCS
LT code
DVB-T
Codici Turbo (DVB-RCS)
DVD
RS e convoluzionali con decodifica Viterbi
DVB-S
Galileo
Riscoperta dei LDPC
Turbo Codici
1990
CD audio
schema TCM
1980
RS+convoluzionale
(missioni spaziali)
Voyager
Viking
Convoluzionali
1970
Mariner
i codici sono utilizzati
per le missioni spaziali
Pioneer 9
decodifica di Viterbi
codici concatenati
tesi su LDPC
1960
codici RS
codici BCH
codici ciclici
codici convoluzionali
codici prodotto
il primo algoritmo di soft-decision
le basi dei codici binari
le fondamenta
1948

Fig. 9 - L'articolo di C. E. Shannon nel 1948 costituisce le fondamenta della teoria matematica dei codici e indica relazione fra capacità e banda di un canale soggetto a rumore gaussiano.
Gli anni '50 sono densi di importanti intuizioni: viene descritto il primo algoritmo di soft-decision (Wagner, 1954), sono inventati i codici prodotto e viene evidenziato che, per il raggiungimento del limite di Shannon, occorre utilizzare codici con elevata lunghezza di blocco (P. Elias, 1955), sono inventati i codici convoluzionali (P. Elias, 1955), i codici ciclici (E. Prange, 1957), e con la fine del decennio i codici BCH (A. Hocquenghem, 1959, e R.C. Bose e D.K. Ray-Chaudhuri, 1960).
Degli anni '60 sono le basi teoriche degli schemi di codifica oggi più diffusi: i codici RS (I. S. Reed e G. Solomon, 1960) e LDPC (R. Gallager, 1962), la concatenazione dei codici (G.D. Forney, 1965). Inizia l'uso dei codici per le missioni spaziali (Reed-Muller, 1969). I protagonisti in quegli anni collaborano al Jet Propulsion Laboratory della NASA, fra gli altri, Viterbi e Reed. L'algoritmo di Viterbi è del 1967.
Nel 1977, con le missioni Voyager, è introdotto lo schema basato sul codice RS concatenato con codice convoluzionale e decodifica di Viterbi. Inizia il lungo periodo di predominanza degli schemi basati su RS e codice convoluzionale.
Un ulteriore significativo passo di avvicinamento al limite è ottenuto applicando la codifica convoluzionale ai simboli della modulazione: è lo schema Trellis Coded Modulation (Ungerboeck, 1982).
Le tecniche di integrazione su larga scala rendono finalmente possibile l'adozione degli schemi di decodifica anche su blocchi di elevata lunghezza, guadagnando quindi in efficienza. Questi schemi possono essere adottati negli standard destinati a prodotti per il grande pubblico. Il primo è il CD audio (1982), che adotta uno schema basato sul prodotto di codici RS. Analogo schema, ma con migliori prestazioni, caratterizza il DVD (1996).
Agli inizi degli anni '90 il limite non è ancora stato raggiunto, ma i risultati degli ultimi 15 anni di sviluppo e realizzazioni sembrano stabili. Uno schema efficiente e collaudato è quello adottato per le missioni spaziali. E' un'ottima ragione per utilizzarlo anche per il nascente standard di diffusione da satellite, DVB-S (1994).
L'evento inatteso, che riduce la distanza che ancora separa dal limite è l'invenzione dei Turbo codici (C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimasjshima, 1993). I turbo codici vengono adottati dagli standard DVB-RCS e UMTS (ETSI TS 125 212, 2001). In campo spaziale è utilizzato dal MRO (Mars Reconnaisance Orbiter, 2005).
Nel 1994 sono riscoperti gli LDPC.
Sono "la soluzione finale", vengono adottati per le nuove generazioni di standard per le comunicazioni: DVB-S2 (2005), WiMAX (IEEE-80216e, 2005), 10GBase-T Ethernet (802.3an, 2006), WiFi (IEEE 820.11n, 2007), DVB-T2 (2008), G.hn (ITU G.9960, 2009), DVB-C2(2010).

S2, presieduto da Alberto Morello del Centro Ricerche Rai, mette in competizione codici Turbo e LDPC.

Vincono gli LDPC, e in breve tempo il successo degli schemi basati su LDPC si estende alle nuove generazioni di standard: dopo il DVB-S2 (2005), è adottato per gli altri standard televisivi DB-T2 per la diffusione terrestre e DVB-C e per la distribuzione via cavo, e dagli standard per i collegamenti a microonde Wi-MAX, per le reti wireless WiFi, Ethernet 10GBase-T, per la rete domestica G.hn con distribuzione su linee elettriche, telefoniche e coassiali fino a 1 Gbit/s (ITU G.9960, 2009).

Il loro uso si afferma anche a livello di protezione dei servizi per downloading e streaming (protocollo FLUTE).

E infine, come abbiamo visto all'inizio, arrivano anche a sostituire i sistemi basati su RS anche per i sistemi di memorizzazione.

Il comunicato stampa citato proclama l'attualità della nuova architettura basata su LDPC, in sostituzione su quella basata su codici RS, inventata quasi 50 anni fa. E' vero: l'articolo di Reed-Solomon è esattamente di 50 anni fa, del 1960, ma quello di Gallager, che descrive i codici LDPC, è del 1962, quarantotto anni fa.

Ai risultati di oggi hanno contribuito tutti i protagonisti della nostra storia. Il limite di Shannon è raggiunto da codici con elevata lunghezza blocco, come preconizzava Elias nel 1955, massimizzando la distanza di Hamming fra le parole di codice, utilizzando la soft-decision, adottando schemi che consentano di effettuare la decodifica in parallelo. Ma soprattutto il limite è raggiunto dagli schemi attuali perché oggi la densità di integrazione e la velocità di calcolo consentono di integrare memoria necessaria e algoritmo in una piccola superficie di silicio: in definitiva di realizzare un SoC.

La nostra storia è dunque una storia a lieto fine, il limite indicato nel 1948 è raggiunto, dopo circa mezzo secolo. Eppure, come è tipico nell'ambito scientifico, l'obiettivo non è il raggiungimento del limite, ma è il suo superamento, lo scoprire ciò che ci attende, oltre l'orizzonte.

Quale sarà la continuazione di questa storia, il progresso dovuto ai codici per la protezione contro gli errori, nel campo della memorizzazione, delle esplorazioni spaziali e delle comunicazioni sulla terra?

Bibliografia

1. *M. Barbero, N. Shpuza:* "Rivelazione, Correzione e Mascheramento degli Errori - Parte I", Elettronica e Telecomunicazioni, Aprile 2008.
2. *M. Barbero, N. Shpuza*: "Prossimi al limite di Shannon, 60 anni dopo", Elettronica e Telecomunicazioni, Agosto 2008.
3. *V. Mignone, A. Morello:* "Il sistema DVB-S2 di seconda generazione per la trasmissione via satellite e Unicast", Elettronica e Telecomunicazioni, Dicembre 2003.
4. *V. Mignone, A. Morello, G. Russo, P. Talone:* "DVB-T2 - la nuova piattaforma per la televisione digitale terrestre", Elettronica e Telecomunicazioni, Dicembre 2008.
5. *A. Shokrollahi*: "Raptor Codes",IEEE Trans. on Information Theory, vol. 52, No.6, June 2006
6. A. *Bertella, P. Casagranda, D. Milanesio e M. Tabone*: "Il sistema DVB-H per la TV Mobile", Elettronica e Telecomunicazioni, Dicembre 2005.

Gli articoli legati alla evoluzione degli algoritmi di protezione dagli errori, a partire da quello di Shannon, sono riportati nella bibliografia di [2].

Le specifiche dei vari sistemi DVB possono essere reperite in:
www.dvb.org/technology/standards/index.xml

Che cosa è, come funziona

L'acustica architettonica

Aspetti fisici

Parte I

Leonardo **Scopece**
Alberto **Ciprian***

Sommario

L'acustica architettonica è il campo di studio che si deve affrontare nel momento in cui c'è la necessità di realizzare un ambiente adatto a un particolare tipo di ascolto come, ad esempio, concerti e conferenze. Questo è il primo di tre articoli nei quali si cerca di offrire una panoramica il più completa possibile sul tema della progettazione acustica degli ambienti chiusi, che va necessariamente distinta da quella degli spazi aperti, nei quali i fenomeni fisici sono differenti. Nello specifico si vuole trattare l'aspetto fisico dell'acustica, ripercorrendo i più importanti principi da tenere in considerazione nel momento in cui si decide di realizzare un trattamento acustico di un ambiente. Molti ritengono che per ottenere un ascolto perfetto in una sala basti spendere molto per un sistema di altoparlanti, ma questo è proprio uno dei maggiori errori che si può commettere. Tutto ciò perché non si conoscono i principi fondamentali dell'acustica e non si tengono in considerazione tutti i fenomeni che si possono generare dall'interazione di un'onda sonora con l'ambiente e tra le onde stesse.
Ci si pone l'obiettivo di fornire, nel modo più chiaro e completo possibile, le basi per comprendere i fenomeni legati all'acustica fisica in modo da poter valutare al meglio che tipo di progettazione sonora si deve utilizzare per soddisfare alle proprie necessità.

1. Introduzione

Per definizione, l'acustica architettonica è quella disciplina che tratta della produzione, propagazione e ricezione del suono all'interno di ambienti chiusi. La progettazione acustica degli ambienti deve, quindi, tenere in considerazione una grande quantità di elementi come le caratteristiche fisiologiche dell'apparato uditivo umano, gli aspetti "naturali" delle onde, la modalità di propagazione nell'aria, gli aspetti "artificiali" come le varie tipologie di arredamento e strumentazione interna.

Questo è il primo di tre articoli dove si vogliono analizzare i vari aspetti atti a valutare quale può essere la progettazione di un ambiente per l'ascolto, partendo da considerazioni quali i parametri fisici e le tecniche per stimare i comportamenti delle onde sonore, fino all'analisi delle tipologie di materiale e delle diverse tipologie di componenti che contribuiscono alla correzione acustica della sala.

* L'articolo è parte delle attività realizzate per la tesi proposta per la laurea specialistica in ingegneria di Alberto Ciprian: "Analisi e studio della diffusione sonora multicanale in ambienti chiusi. Studio e realizzazione di una stanza per l'ascolto surround". Tesi di Laurea Politecnico di Torino, 2010, sviluppata presso Centro Ricerche della Rai. Tutor Rai: dott. Leonardo Scopece.

2. Parametri fisici

2.1 Propagazione dell'onda sonora

Ogni suono ha origine dalla vibrazione di un corpo elastico. Questa ha un andamento ondulatorio, descrivendo quindi nel tempo una traiettoria che si può rappresentare graficamente, nel modo più semplice, come una sinusoide. Esistono diverse componenti che caratterizzano un'onda, tra cui la più importante è la frequenza. Questo parametro fisico permette di definire un parametro sensoriale: l'***altezza del suono***, ossia se aumenta la frequenza un suono tende a diventare più acuto, mentre se diminuisce diventa più grave.

Un secondo parametro fisico è l'ampiezza dell'oscillazione, che permette di determinare un altro parametro sensoriale: l'***intensità del suono***.

Per capire come avviene la propagazione è necessario prima capire come è fatta a livello strutturale l'aria. É formata da una grande quantità di molecole "unite" tra loro da legami elastici; ad esempio, si può affermare che quando un corpo vibra comunica il suo movimento alla prima molecola d'aria "confinante", la quale, spostandosi, spinge la molecola successiva, e così via. Un attimo dopo, i legami elastici (che possono essere immaginati come molle), richiamano indietro la molecola nella sua posizione iniziale di equilibrio. Per effetto di questi movimenti ci saranno delle zone di compressione e rarefazione dell'aria. Queste si ripetono dalla sorgente nel verso di propagazione dell'onda sonora. Considerando una generica sorgente sonora, il suono tende a propagarsi allo stesso modo in tutte le direzioni (cioè secondo fronti d'onda sferici, figura 1). La superficie del fronte d'onda aumenta in modo proporzionale con il quadrato della distanza dalla sorgente.

Fig. 1 – Propagazione.

Di conseguenza, l'energia che possiede il fronte d'onda si distribuisce su tutta la superficie, per cui su una singola unità di superficie si ha che l'energia decresce con il quadrato della distanza.

Siccome l'energia è proporzionale all'intensità sonora, si può affermare che l'intensità sonora decresce con il quadrato della distanza, quindi:

- raddoppiando la distanza, l'intensità sonora decresce di 6 dB
- decuplicando la distanza, l'intensità sonora decresce di 20 dB

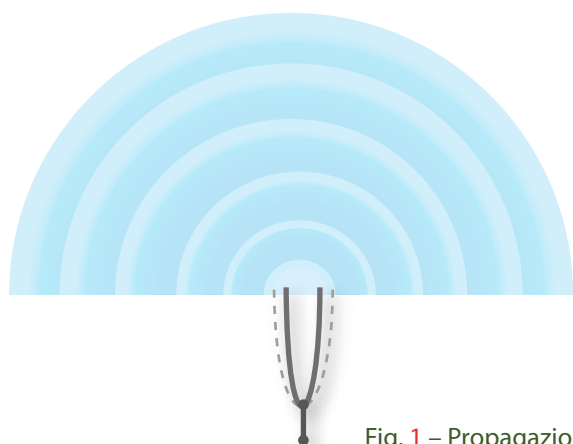
É, inoltre, da sottolineare il fatto che il suono si propaga a una velocità che dipende principalmente dalla natura del mezzo elastico in cui si diffonde, ma anche dalla temperatura, dalla pressione e dall'umidità. Di seguito vengono riportati alcuni valori della velocità di propagazione in diversi materiali a 20°C e al livello del mare:

Materiale	*Velocità [m/s]*
Aria	343
Acqua	1480
Ghiaccio	3200
Vetro	5300
Piombo	1200

Un'altra grandezza fondamentale legata alla propagazione del suono è la lunghezza d'onda λ, cioè la distanza fra due punti consecutivi dell'onda che vibrano in concordanza di ampiezza e fase. La lunghezza d'onda si misura in metri ed è in funzione della frequenza e della velocità di propagazione secondo la seguente relazione:

$$\lambda = v / f$$

dove v è la velocità di propagazione e f è la frequenza.

Questa grandezza ha un ruolo importante soprattutto quando ha una misura paragonabile a quella delle

dimensioni dell'ambiente di diffusione, in quanto determina il fenomeno delle onde stazionarie. La tabella seguente mostra alcuni valori di lunghezze d'onda in funzione della frequenza in aria libera:

Frequenza [Hz]	*Lunghezza d'onda [m]*
20	17
50	6.8
100	3.4
250	1.36
2000	0.17
5000	0.068
10000	0.034
20000	0.034

2.2 Le onde stazionarie

Le onde stazionarie sono particolari tipi di perturbazioni periodiche, le cui oscillazioni sono limitate nello spazio. L'ampiezza dell'oscillazione è nulla in alcuni punti, detti nodi, mentre è massima in altri, detti ventri; ogni ventre si trova a metà tra due nodi.

Immaginando una coppia di onde che si propaga in uno spazio delimitato da due superfici parallele riflettenti, si nota come l'onda stazionaria viene generata dalla somma delle due onde. A questo punto risulta necessario modificare l'equazione dell'onda, aggiungendo le condizioni al contorno che limitano il moto. Detto ***L*** lo spazio di propagazione, l'equazione dell'onda diventa:

$$\frac{\partial^2 \zeta(x,t)}{\partial^2 x} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \zeta(x,t)}{\zeta \; t^2}$$

alla quale vanno aggiunte le seguenti condizioni: $\zeta(0,t) = A$ e $\zeta(L,t) = B$. Si ottiene quindi la soluzione generale della formula:

$$\zeta(x,t) = A\cos(kx) + B\sin(kx)$$

Le onde stazionarie si possono quindi considerare come il risultato dell'interferenza di onde progressive e regressive sinusoidali aventi la stessa frequenza.

2.3 Riflessione

La riflessione è uno dei fenomeni più comuni che si manifesta nel momento in cui un'onda sonora entra in contatto con una superficie. Quello che però può apparire meno ovvio è il fatto che la riflessione si genera soltanto nel caso in cui la dimensione della superficie riflettente dell'onda sonora sia sufficientemente grande rispetto alla lunghezza d'onda **λ**. Quindi, in base alla dimensione dell'ostacolo che incontra l'onda si possono avere diversi effetti:

- se la dimensione dell'ostacolo è minore di 1/3 di **λ** non c'è riflessione
- se la dimensione è comparabile con **λ** si ha una riflessione solo della metà dell'energia e si passa al fenomeno della diffrazione
- se la dimensione è maggiore del triplo di **λ** allora si ha riflessione totale

2.4 Diffrazione

É un fenomeno complementare alla riflessione che si definisce come la deviazione della traiettoria delle onde, quando queste incontrano un ostacolo fisico. In particolare, quando la lunghezza d'onda è grande e non ci sono riflessioni, o comunque sono molto poche, si può assumere che l'onda aggiri l'ostacolo. Similmente, quando la lunghezza d'onda è piccola, c'è una buona riflessione, tuttavia parte dell'energia è in grado di aggirare l'ostacolo. In questo caso si parla di ombra acustica (figura 2); se, invece, le dimensioni dell'ostacolo sono maggiori della lunghezza d'onda dell'onda incidente, si manifestano solo parziali fenomeni di ombra acustica.

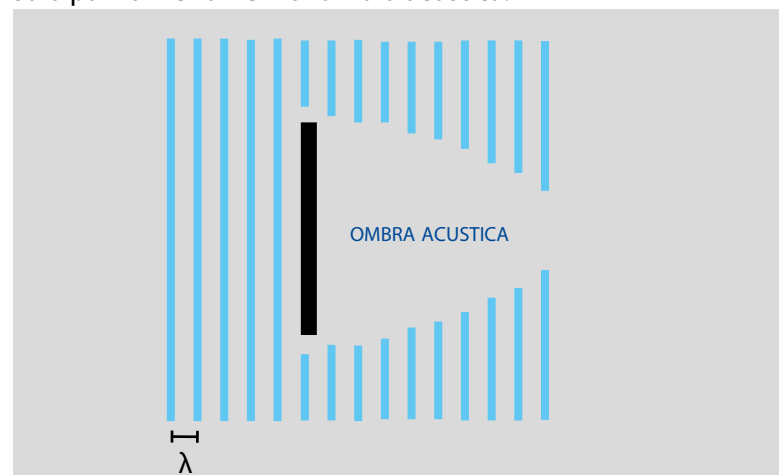



Fig. 2 - Ombra acustica.

Quando su una superficie è presente un'apertura di dimensioni maggiori di **λ**, l'onda passa attraverso generando un fascio stretto, mentre se **λ** è grande si produce un fascio diffuso (figura 3).

2.4.1 Principio di Huygen

Il principio di Huygen è un metodo di analisi applicato spesso per lo studio della propagazione delle onde luminose. Secondo Huygen: "*...ciascuna particella della materia in cui un'onda viaggia comunica il suo moto non solo alla particella vicina che è allineata con la sorgente luminosa, ma necessariamente anche alle altre con le quali è a contatto e che si oppongono al suo movimento. Cosicché intorno a ciascuna particella si origina un'onda di cui essa è il centro*". In sintesi il principio afferma che tutti i punti di un fronte ***F(t)*** possono essere considerati sorgenti puntiformi di onde sferiche secondarie aventi la stessa frequenza dell'onda principale.

Dopo un tempo ***Δt*** la nuova posizione del fronte ***F(t + Δt)*** sarà la superficie di inviluppo di queste onde secondarie. Il campo complessivo è dato dalla sovrapposizione dell'onda primaria con quelle di ordine superiore.

Pur essendo nato per studiare i fenomeni luminosi, questo principio, può essere esteso per la previsione di tutti i fenomeni ondulatori.

Fig. 3 - Diffrazione: a) λ < d, b) λ > d.

2.5 Rifrazione

La rifrazione è un fenomeno per il quale la curvatura del percorso delle onde sonore cambia quando passano da un mezzo elastico a un altro, in cui la velocità di propagazione è diversa. Un esempio si può avere quando con una temperatura calda e un clima umido i suoni distanti vengono percepiti con estrema chiarezza. Questo è giustificabile con una "inversione" di temperatura, ovvero il terreno si raffredda velocemente e gli strati d'aria diventano più caldi rispetto a quelli in prossimità del suolo. In altre parole, se la temperatura dell'aria è maggiore di quella della superficie, le onde si direzionano all'ingiù verso la superficie per effetto della rifrazione.

Questo fenomeno viene descritto tramite la legge di Snell, secondo cui il rapporto tra il seno dell'angolo generato da un raggio incidente su una superficie e quello generato dal raggio rifratto è uguale al rapporto inverso degli indici di rifrazione dei mezzi attraversati dai raggi:

$$\frac{\sin\alpha_{inc}}{\sin\alpha_{rifr}} = \frac{n_2}{n_1}$$

L'indice di rifrazione è definito come:

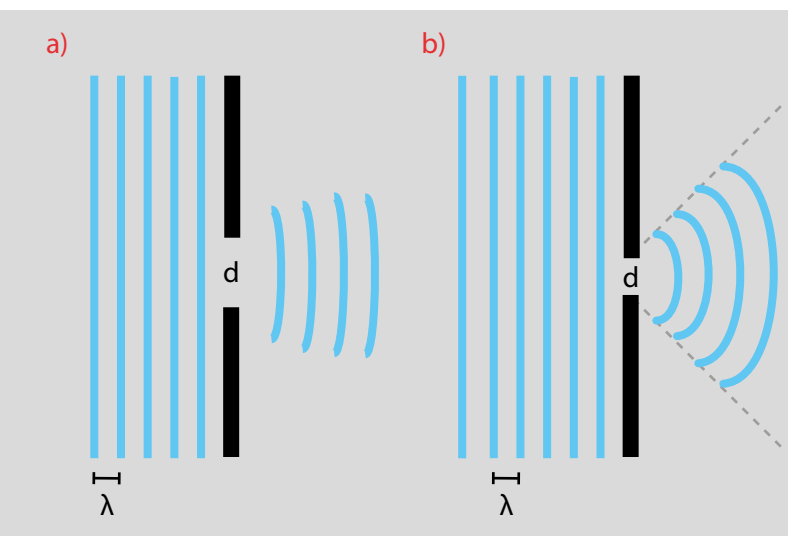
$$n = \frac{c}{v}$$

dove ***c*** è la velocità della luce e ***v*** è la velocità dell'onda attraverso un certo mezzo di propagazione. Perciò la relazione precedente può essere riscritta come:

$$\frac{\sin\alpha_{inc}}{\sin\alpha_{rifr}} = \frac{v_1}{v_2}$$

In realtà, nel caso di un'onda sonora, la rifrazione è rappresentata sempre dal rapporto dei seni uguale, però, al rapporto tra la velocità nel mezzo rifrangente e la velocità nel primo mezzo:

$$\frac{\sin\alpha_{inc}}{\sin\alpha_{rifr}} = \frac{v_2}{v_1}$$

Quindi, l'onda sonora non si avvicina alla normale al piano di incidenza nel mezzo, con indice di rifrazione n_2, ma si allontana per ritrovarsi parallela a prima del momento di incidenza quando si ripassa al mezzo con indice di rifrazione $n_1 > n_2$.

2.6 Risonanza in tubi e corde

La risonanza è un fenomeno fisico per il quale un corpo elastico inizia a vibrare a una certa frequenza propria dopo essere stato eccitato con una certa energia. Per analizzare meglio il fenomeno è utile valutare il comportamento di un'onda all'interno di un tubo, in tre condizioni differenti, e di una corda.

2.6.1 Tubi

- ***pareti chiuse***: questo caso è equivalente allo studio del comportamento delle onde stazionarie (figura 4).

  A seguito di un'opportuna eccitazione, il tubo risuona alla frequenza propria per una lunghezza di ***λ/2*** e per frequenze superiori. L'ampiezza ***p*** che si crea dalla sovrapposizione delle onde è data dalla relazione:

$$p = p_{\max}\left(\cos 2\pi \frac{x}{\lambda}\right)(\cos 2\pi f t)$$

  Da notare è la presenza di tre zone nodali[Nota 1] in prossimità delle pareti e al centro.

- ***una parete chiusa***: in questo caso è possibile verificare un fenomeno meno ovvio di quanto si possa pensare, ovvero: dalla parte aperta del tubo è possibile notare una riflessione parziale dell'onda sonora. Questo fatto è spiegabile poiché la velocità del suono in un grande volume d'aria è leggermente differente rispetto al caso in cui l'area è limitata a causa dell'effetto di attrito delle pareti, così le onde all'interno del tubo trovano condizioni di trasmissione differenti sull'apertura a causa della variazione d'impedenza nel mezzo. La riflessione non è mai completa, ma viene riflessa soltanto una parte dell'energia, a seconda delle dimensioni del tubo. Tuttavia, in alcuni casi può essere sufficiente per dare origine al fenomeno delle onde stazionarie. In figura 5 è possibile vedere la rappresentazione del tubo aperto da un lato. Nel modo di vibrazione più semplice la lunghezza del tubo si approssima a ***λ/4***. Si "approssima" in quanto la lunghezza acustica del tubo non corrisponde esattamente alla lunghezza fisica.

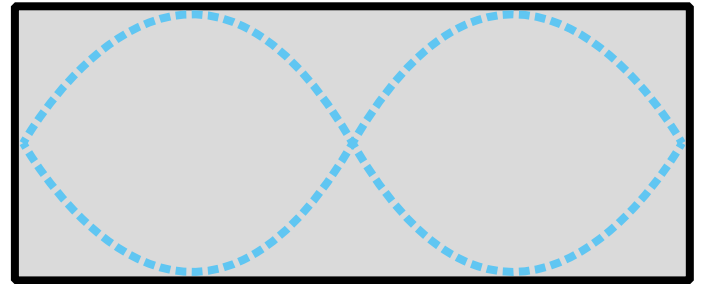



Fig. 4 - Tubo con pareti chiuse.

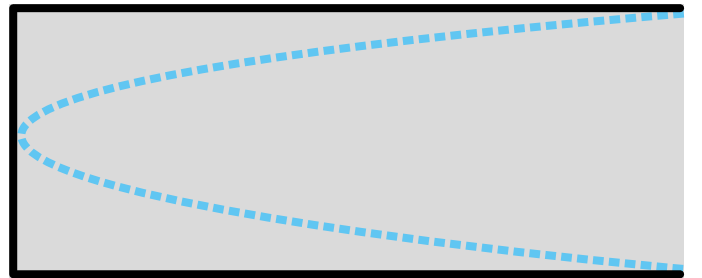



Fig. 5 - Tubo con lato aperto.

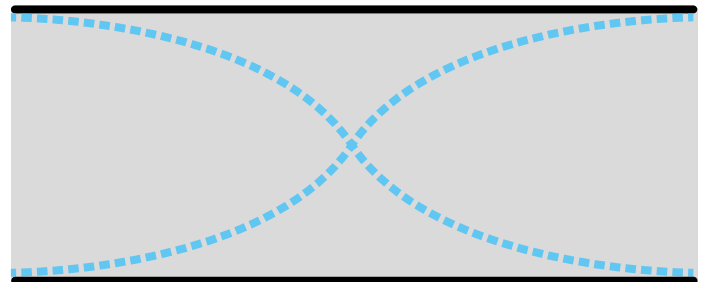



Fig. 6 - tubo con pareti aperte.

La lunghezza acustica è data dalla somma ***l+a*** , dove "***l***" è la lunghezza fisica del tubo, mentre "***a***" corrisponde a un parametro di correzione[Nota 2]. Da questo si deduce come la minima frequenza di risonanza sia:

$$f_{ris} = \frac{nv}{4(l+a)}$$

dove ***n*** corrisponde al numero dell'armonica (***n***=1,2,3,...) diverso da 0.

Per quanto riguarda la pressione, è da notare che è nulla in prossimità del lato aperto del tubo, mentre è massima in prossimità del lato chiuso.

Nota 1 - punti in cui l'onda diretta e quella riflessa si intersecano e l'ampiezza è pari a 0.
Nota 2 - normalmente equivale a 0,6 • r, dove r è il raggio.

- ***pareti aperte***: in questo caso (figura 6), il valore ***l*** corrisponde a metà della lunghezza d'onda (***λ/2***). Siccome le pareti laterali sono aperte entrambe, è necessario apportare una doppia correzione, quindi la lunghezza acustica vale ***l+2a***.

  É da notare, inoltre, che in questo caso, a differenza del primo con le pareti chiuse, in prossimità delle pareti ci siano due ventri[Nota 3].

  La frequenza di risonanza viene quindi descritta dalla seguente relazione:

$$f_{ris} = \frac{nv}{2(l+2a)}$$

  Bisogna infine notare che in tutti e tre i casi, l'onda sonora trova nel tubo, chiuso e aperto, un amplificatore naturale. Il tubo può amplificare fino a 10÷12 dB il segnale eccitatore.

2.6.2 Vibrazioni nelle corde

Per valutare le vibrazioni prodotte nelle corde si assume che la loro lunghezza sia maggiore del loro spessore e che siano flessibili. La velocità di un'onda trasversale corrisponde a:

$$v = \left(\frac{T}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$$

dove ***T*** è la tensione della corda, mentre ***m*** è la massa per unità di lunghezza. Analogamente a quanto descritto per i tubi, si considera il modo semplice di vibrazione come quello del caso in cui alle estremità ci siano due ventri (ad esempio nel tubo aperto ad entrambe le estremità), cioè ***λ = 2l***. Di conseguenza, la minima frequenza di vibrazione è:

$$\frac{1}{2l}\left(\frac{T}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Le armoniche prodotte in una corda vibrante dipendono dalla natura e dalla modalità dell'eccitazione. Le onde longitudinali, invece, hanno una velocità che corrisponde a:

$$v = \left(\frac{y}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

dove ***y*** è il modulo di Young[Nota 4], mentre ***ρ*** è la densità. Considerando ad esempio l'acciaio (***y*** = 2 • 1011 N/m² e ***ρ*** = 8 • 103 kg), si ha che ***v*** = 500 m/s.

L'espressione per la minima frequenza per le onde longitudinali è:

$$\frac{1}{2l}\left(\frac{y}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Sostituendo dei valori rilevanti, si è evidenziato come la frequenza per le vibrazioni longitudinali sia maggiore rispetto a quella per le vibrazioni trasversali.

2.7 Riverbero

Ogni volta che un'onda sonora colpisce una superficie all'interno di un ambiente ha origine, come detto, una riflessione, che a sua volta darà origine ad altre, e così via. Siccome la velocità di propagazione del suono è elevata (≈340 m/s), in pochi centesimi di secondo dall'uscita del suono dalla sorgente la stanza è immersa in riflessioni che si aggiungono e modificano il suono diretto. La somma delle riflessioni viene detto riverbero, e, quindi, il campo sonoro costituito dall'insieme delle onde (ognuna caratterizzata da un certo ritardo temporale e da un certo livello di attenuazione) viene detto campo di riverberazione.

2.7.1 Tempo di riverberazione

Uno dei parametri più importanti per valutare la qualità acustica di un ambiente è il *tempo di riverberazione* o *tempo di Sabine*, indicato comunemente con la sigla T_{60}, che indica il tempo necessario affinché la densità media dell'energia sonora diminuisca di 60 dB. Generalmente per ambienti poco riverberanti il valore del T_{60} è minore di un secondo, mentre per ambienti molto riverberanti è maggiore di due secondi.

Nota 3 - punti in cui l'ampiezza generata tra la prima e la seconda onda è massima.
Nota 4 - è dato dal rapporto tra la forza applicata σ e l'allungamento relativo ε.

Il calcolo del T_{60} può essere effettuato tramite due equazioni:

- ***equazione di Sabine:*** fornisce risultati accurati nel caso in cui il valore medio dei coefficienti di assorbimento dei materiali considerati sia inferiore a 0.2. Trascurando gli effetti di assorbimento dell'aria sopra i 4 kHz si ottiene la seguente relazione:

$$T_{60} = \frac{1}{6}\frac{V}{\sum S_n \alpha_n}$$

dove V è il volume della stanza espresso in m^3, S_n è la superficie n-esima dell'n-esimo materiale che costituisce le pareti della stanza espressa in m^2 e α_n è il coefficiente di assorbimento dell'n-esimo materiale corrispondente.

- ***equazione di Eyring***: viene utilizzata quando il valore medio dei coefficienti di assorbimento è maggiore di 0,2 e per frequenze inferiori a 4 kHz. Al denominatore viene aggiunto un termine per considerare l'assorbimento dell'aria alle alte frequenze:

$$T_{60} = -\frac{1}{6}\frac{V}{S \cdot \ln(1-\overline{\alpha})}$$

Dove S è la superficie totale della stanza, mentre $\overline{\alpha}$ è il coefficiente di assorbimento medio dei materiali presenti nella stanza.

2.7.2 Tempo di riverberazione ottimale

Nello studio della progettazione acustica di una sala è necessario tenere conto non solo dell'architettura della sala ma anche del suo volume, dell'arredamento dell'ambiente e dell'assorbimento complessivo, con e senza le persone all'interno.

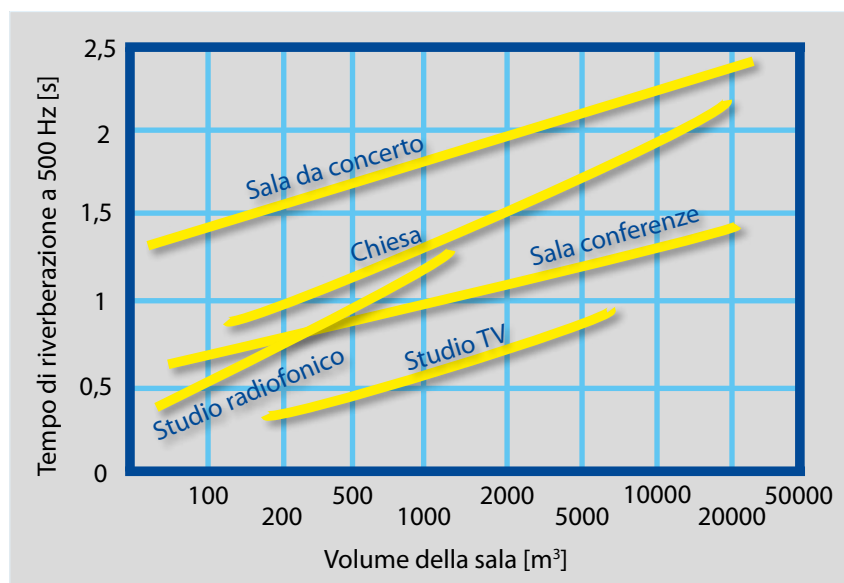
É chiaro che la progettazione dipende espressamente dal fine di utilizzo della sala e, quindi, anche il tempo di riverberazione dovrà essere differente in base all'obiettivo. Risulta quindi necessario considerare il concetto di tempo di riverberazione ottimale, che caratterizza i vari ambienti.

In figura 7 è riportato un grafico che evidenzia alcuni tempi di riverberazione tipici in funzione del volume.

Il colore del suono tende a essere brillante se la riverberazione agisce sulle frequenze alte, mentre apparirà cupo se vengono esaltate le basse frequenze. Quindi si può affermare che per un buon ascolto il tempo di riverbero alle basse frequenze deve essere più alto: $T_{60}(bf) > T_{60}(af)$.

2.7.3 Distanza di riverberazione

La distanza di riverberazione è definita come la distanza dalla sorgente per cui il campo possa essere considerato "diffuso". Si considera un ambiente riverberante con una sorgente S e un ascoltatore A. Il livello di pressione L_t percepito dall'ascoltatore è dato dalla somma di due pressioni: la radiazione diretta L_d, che rappresenta il livello di pressione sonora SPL (*Sound Pressure Level*) che arriva direttamente all'ascoltatore, e la radiazione riflessa L_r, che rappresenta il livello di pressione sonora dovuta alle riflessioni.

Fig. 7 - Tempi di riverberazione tipici di alcuni ambienti.

Per cui:

$$L_t = L_d + L_r$$

La distanza di riverberazione può essere calcolata mediante la relazione:

$$r_r = 0.25\left(\alpha \frac{S}{\pi}\right) \approx 0.06\sqrt{\frac{V}{T_{60}}}$$

2.7.4 Esempio: effetto del riverbero sul parlato

Per spiegare l'effetto della riverberazione, si può considerare un esempio in cui l'influenza del riverbero è evidente: si considera una parola di due sillabe, come ad esempio "casa". Si suppone che la sillaba "...sa" si trovi a 25 dB sotto il livello di picco della prima sillaba e che raggiunga il proprio picco 0,32 s dopo la prima. Entrambi i suoni sono transitori che crescono e decadono velocemente. In figura 8 viene raffigurato lo schema dei fattori: la sillaba "ca..." raggiunge il picco a un livello fissato arbitrariamente a 0 dB all'istante t = 0, successivamente decade a seconda del tempo di riverberazione della stanza (come ipotesi si considera che sia di 0,5 s). La seconda sillaba raggiunge il picco, come detto, 0,32 s dopo e decade sempre in 0,5 s. In questa situazione la sillaba "...sa" non viene mascherata dalla prima. Se invece il tempo di riverberazione della stanza fosse maggiore di 0,5 s, ad esempio 1,5 s (raffigurato con le linee tratteggiate), la seconda sillaba sarebbe completamente mascherata.

L'effetto principale di un'eccessiva riverberazione è quindi quello di compromettere l'intelligibilità del parlato (cosa molto comune in ambienti come chiese e palestre), mascherando i suoni consonantici di livello inferiore.

Da questo esempio si può quindi concludere come in ambienti come parlatori, o comunque adibiti per l'ascolto del parlato, il tempo di riverberazione deve essere inferiore rispetto ad ambienti come sale da concerto.

2.8 Criteri Energetici

La fisiologia dell'apparato uditivo umano non permette di distinguere i suoni molto ravvicinati nel tempo (50 ms nel caso del parlato e 80 ms nel caso della musica) e le riflessioni vengono spesso interpretate come parte del suono diretto. L'energia che arriva prima di 50 ms si chiama energia utile, perché i contributi delle riflessioni si sommano al suono diretto, mentre l'energia che arriva dopo si chiama

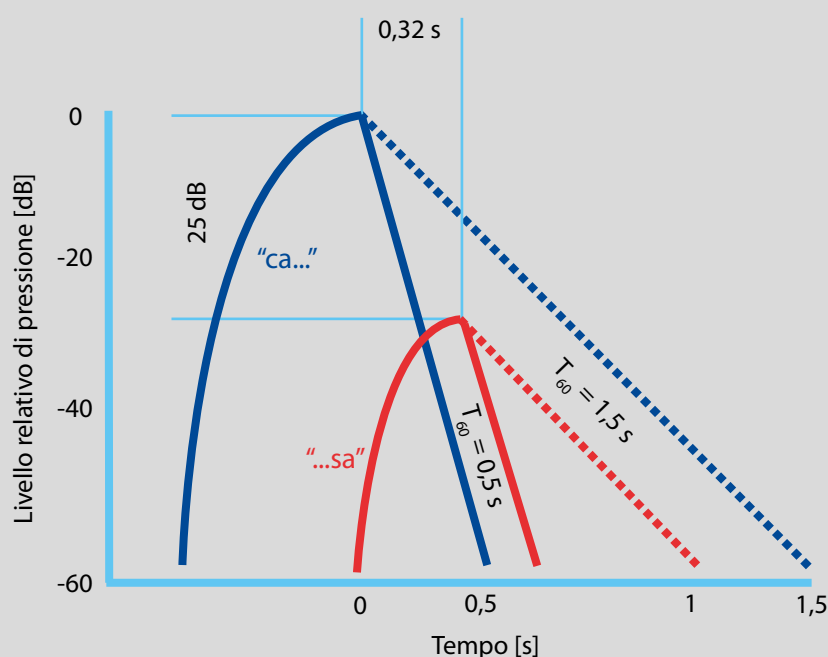



Fig. 8 - Effetto della riverberazione sul parlato.

energia dannosa, perché rischia di danneggiare la percezione sonora.

Per valutare il contributo energetico, la norma ISO 3382[Nota 5] considera tre indici: *definizione*, *chiarezza* e *speech transmission*.

- ***Definizione***[Nota 6]: misura la chiarezza con la quale l'ascoltatore percepisce il messaggio parlato. È definito come il rapporto tra l'energia utile e l'energia totale.

$$D_{50} = \frac{\int_{0ms}^{50m} p^2(t)dt}{\int_{0ms}^{\infty} p^2(t)dt}$$

dove $t = 0$ è l'istante in cui giunge l'impulso diretto. I valori ottimali sono compresi tra 0,3 e 0,7.

- ***Chiarezza***[Nota 7]: misura la possibilità di percepire nitidamente note musicali suonate in rapida successione. È il rapporto tra l'energia sonora ricevuta nei primi 80 ms del suono diretto e quella che giunge successivamente, espresso in dB.

$$C_{80} = \frac{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t)dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t)dt}$$

I valori ottimali sono compresi tra -2 dB e +2 dB.

- ***STI***: è un parametro per valutare l'intelligibilità del parlato. È definito come un rapporto di energie.

$$STI = \frac{\int_{10m}^{100ms} p^2(t)dt}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t)dt}$$

Nota 5 - stabilisce le procedure da seguire per la determinazione del tempo di riverbero negli auditori.
Nota 6 - *Early Energy Fraction*.
Nota 7 - *Early to late Sound Index*.

2.9 Eco

L'eco è un fenomeno fisico prodotto dalla riflessione delle onde sonore contro un ostacolo, causata dalla discontinuità del mezzo di propagazione. Le onde riflesse tornano all'emettitore con una certa intensità e un certo ritardo in modo da poter essere percepite separatamente da quella diretta.

Spesso si tende a confondere erroneamente l'eco con il riverbero. I due fenomeni si differenziano, infatti, per due parametri: il ritardo con cui l'onda riflessa torna all'emettitore e la distanza tra la sorgente e l'ostacolo. Affinché si parli di eco, il ritardo non deve essere inferiore a 1/10 di secondo, mentre la distanza minima deve essere pari a 17 m. Il valore di quest'ultimo parametro non è casuale: se infatti si considera che la velocità del suono in aria a 20°C è ≈340 m/s e che il ritardo è 1/10 di secondo, allora risulta che, in aria, il percorso totale è 34 m, cioè 17 m dalla sorgente all'ostacolo e 17 m per il percorso inverso.

3. Elementi di progettazione acustica degli ambienti chiusi

La progettazione acustica di un ambiente rappresenta un problema complesso da analizzare a causa della grande quantità di fattori che influiscono, e tutto ciò risulta amplificato nel caso in cui si considerino ambienti chiusi. Restringendo l'attenzione, per il momento, soltanto agli aspetti fisici, esistono modelli di calcolo che permettono di fare previsioni quantitative utili nell'ambito dell'acustica tecnica. Spesso, per un ambiente chiuso si distingue il problema della descrizione a bassa frequenza da quello ad alta frequenza, ovvero è possibile definire l'ambiente di dimensioni piccole o grandi a seconda della frequenza d'interesse. Come parametro di misura si considera la lunghezza d'onda e in particolare il rapporto tra le dimensioni lineari del locale e la lunghezza d'onda. Ad esempio, una dimensione media dieci volte più grande della lunghezza d'onda definisce un ambiente di grandi dimensioni.

Se si considera la gamma di frequenze dell'udito umano, la lunghezza d'onda in aria a 20 Hz è pari a 17 m, mentre a 20 kHz è 1,7 cm.

3.1 Descrizione modale

La teoria modale permette di dare una descrizione del suono negli spazi chiusi molto accurata, in quanto è in grado di rappresentare in modo preciso gli aspetti della fenomenologia ondulatoria che spesso non vengono considerati da altri modelli.

Per chiarire il concetto è opportuno considerare la seguente situazione. Si consideri un ambiente parallelepipedo (figura 9), in cui gli spigoli, orientati lungo i tre assi, sono di lunghezza l_x, l_y e l_z.

All'origine del sistema di assi cartesiani viene collocata una sorgente puntiforme, che pulsa secondo la legge armonica semplice alla frequenza angolare ω con ampiezza P_0. Inoltre, si considerano le superfici interne come uniformi e poco assorbenti.

La soluzione dell'equazione delle onde, con il termine dovuto alla sorgente, nota come equazione di Helmotz non omogenea, fornisce il valore della pressione sonora ***p(x,y,z)*** come somma di una serie di funzioni complesse $p_n(x, y, z)$. Ciascuna funzione

Fig. 9 - Stanza parallelepipeda con sorgente puntiforme.

$p_n(x, y, z)$ rappresenta un modo naturale dell'ambiente:

$$p(x,y,z) = \sum_n p_n(x,y,z)$$

dove l'ampiezza del generico modo n è data dall'espressione:

$$\left|p_n(x,y,z)\right| = \frac{\rho_0 v^2 \omega P_0}{V \cdot \sqrt{4\omega_n^2 k_n^2 + \left(\omega^2 - \omega_n^2\right)^2}} \psi_n(x,y,z)$$

dove:

- ρ_0 è la densità dell'aria nell'ambiente espressa in kg/m³;
- ω è la frequenza angolare della sorgente;
- ω_n è la frequenza angolare naturale del modo ***n***;
- ***V*** è il volume dell'ambiente;
- k_n è la costante di smorzamento del modo ***n***;
- ψ_n (x, y, z) è la forma modale per il modo ***n***, che esprime la dipendenza

dell'ampiezza del modo ***n*** dalle coordinate spaziali:

$$\psi_n(x,y,z) = \cos\left(\frac{n_x \pi x}{l_x}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \pi y}{l_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \pi z}{l_z}\right)$$

con n_x, n_y, n_z = 0,1,2,3,...;

La precedente relazione evidenzia come ogni modo sia individuato da una terna di numeri interi, detti numeri modali, ognuno dei quali può assumere qualsiasi valore a partire da 0.

La dipendenza spaziale di ciascun modo corrisponde a un campo stazionario tridimensionale dovuto a coppie di onde piane di uguale ampiezza e frequenza, che viaggiano in verso contrario lungo traiettorie rettilinee individuate dai rapporti n_x/l_x, n_y/l_y, n_z/l_z.

I modi si distinguono in tre categorie:

- ***modi assiali***: le onde componenti viaggiano lungo una direzione parallela ad un asse coordinato e interagiscono con la coppia di superfici contrapposte e ortogonali all'asse considerato. Questi modi sono contraddistinti da un solo

numero modale non nullo, quindi la terna si presenta come (n_x, 0, 0), (0, n_y, 0) o (0, 0, n_z). Siccome dipendono da una sola coordinata si definiscono anche *modi monodimensionali*.

- ***modi tangenziali***: le onde componenti viaggiano lungo direzioni appartenenti a piani paralleli ai piani coordinati e interagiscono con due coppie di superfici contrapposte ortogonali al piano contenente le direzioni di propagazione. In questo caso la terna è caratterizzata da un solo numero nullo, quindi si presenta come (n_x, n_y, **0**), (n_x, **0**, n_z) o (**0**, n_y, n_z). Si definiscono anche *modi bidimensionali*.
- ***modi obliqui***: le onde componenti si propagano secondo direzioni oblique rispetto agli assi coordinati e interagiscono con tutte le coppie di superfici contrapposte del parallelepipedo. I numeri modali sono tutti diversi da 0, quindi, i modi (n_x, n_y, n_z) sono detti *modi tridimensionali*.

Da ciò si può affermare che:

- negli otto vertici del parallelepipedo tutti i modi contribuiscono alla pressione sonora.
- al centro dell'ambiente sono nulli tutti i modi per i quali almeno uno dei tre numeri modali è dispari. Quindi solo 1/8 dei modi disponibili contribuisce alla pressione sonora in quel punto.
- al centro di ciascuna faccia del parallelepipedo manca il contributo dei modi con due numeri modali dispari. Questo comporta che solo 1/4 dei modi possibili può contribuire alla pressione sonora nei punti considerati.
- al centro di ogni spigolo del parallelepipedo manca il contributo dei modi con un numero modale dispari. Quindi solo la metà dei modi possibili può contribuire alla pressione sonora in questi punti.

Le frequenze di risonanza dei modi sono date dalla relazione:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right) + \left(\frac{n_y}{l_y}\right) + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)}$$

Per quanto detto, un ambiente parallelepipedo può

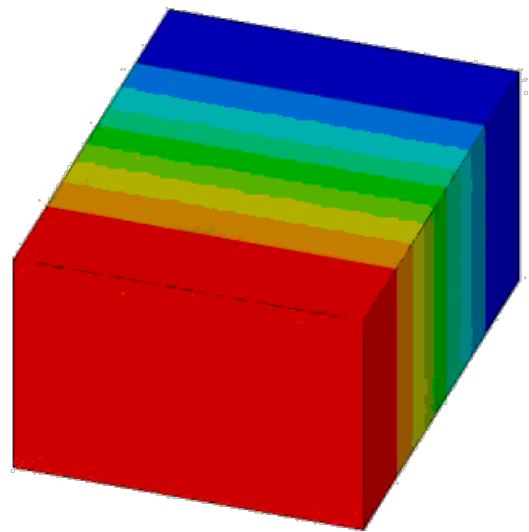



Fig. 10 - Modo assiale.

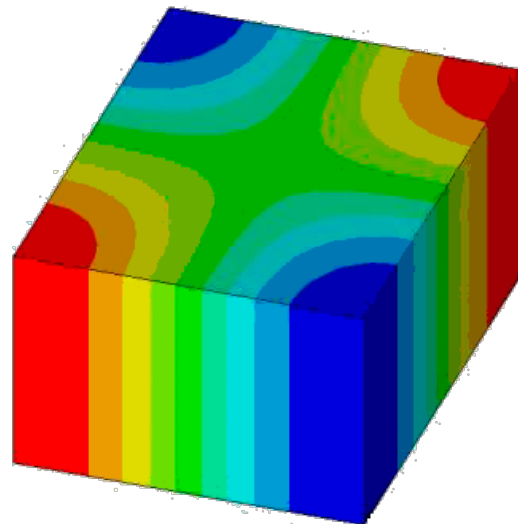



Fig. 11 - Modi tangenziali.

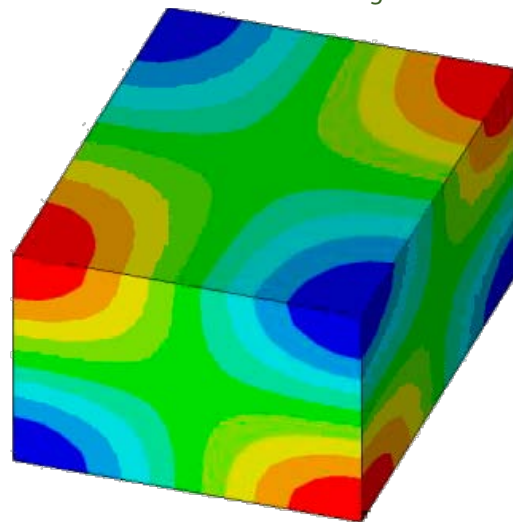



Fig. 12 - Modi obliqui.

Le figure 10, 11 e 12 sono tratte da *M. Fringuellino*, "Acustica dei piccoli ambienti" (seminario al Politecnico del 2009)

essere considerato come un sistema multirisonante. Rimane infine da capire come poter determinare quanti modi possono essere eccitati in risonanza facendo variare la frequenza tra 0 e ***f*** e chiarire il concetto di densità modale.

Il numero di modi può essere calcolato tramite la seguente relazione:

$$N = \frac{4\pi f^3 V}{3c^3} + \frac{\pi f^2 S}{4c^2} + \frac{f + L}{8c}$$

dove ***V*** è il volume dell'ambiente, ***S*** è l'area totale delle superfici, mentre ***L*** è la somma delle lunghezze degli spigoli del parallelepipedo. In realtà, per ambienti relativamente grandi gli ultimi due addendi possono essere trascurati, quindi la formula precedente si approssima come:

$$N \cong \frac{4\pi f^3 V}{3c^3}$$

La densità modale rappresenta il numero di frequenze di risonanza all'interno di una banda unitaria intorno alla frequenza ***f*** e può essere calcolata considerando la derivata della formula precedente rispetto alla frequenza:

$$n(f) = \frac{dN}{df} = \frac{4\pi f^2 V}{c^3}$$

Dato un certo volume ***V***, la densità modale cresce con il quadrato della frequenza. Questo comporta che alle basse frequenze pochi modi contribuiscono in modo efficace alla pressione sonora nell'ambiente, per cui il livello di pressione sonora in regime permanente sinusoidale fluttua spostandosi da punto a punto nell'ambiente. Alle alte frequenze, invece, corrisponde un'elevata densità di modi e le fluttuazioni di livello si riducono muovendosi all'interno dell'ambiente.

Bibliografia

- *L. Scopece*: "L'audio per la televisione", Roma, Gremese, 2009.
- *Everest F. Alton:* "Manuale di acustica", Milano, Hoepli, 1996.
- *R. Spagnolo*: "Manuale di acustica applicata", Milano, Città degli studi, 2008.

Sistemi di diffusione sonora Gli altoparlanti

Leonardo **Scopece**
Alberto **Ciprian***

1. Introduzione

Con le nuove tecniche di ripresa e con i nuovi sistemi di editing audio multicanale e surround, da un po' di anni è cambiato anche il modo di diffondere il segnale sonoro in ambienti di vario tipo: dalle sale per conferenza, che sono diventate ormai sale multimediali, a sale da concerto, alle chiese, ai cinema, agli ambienti domestici.

Sono anni ormai che l'utente si fornisce di sistemi di diffusione casalinghi, *home theatre*, composti normalmente di 5 casse acustiche con l'aggiunta di un sub-woofer (e molte volte dispone questi altoparlanti non dove devono essere disposti, ma dove "stanno bene" con l'arredo della stanza).

In questo articolo si vogliono illustrare le caratteristiche tecniche e tecnologiche degli altoparlanti, in modo che si possa avere un ampio ventaglio di conoscenze sull'argomento.

Sommario
Gli altoparlanti sono il mezzo con cui si riesce ad irradiare in un ambiente il lavoro che molte persone, tecnici, cantanti, produttori e quant'altri, hanno voluto realizzare, alcune volte anche con molti sacrifici. Il problema che ci si trova ad affrontare è proprio la scelta delle casse acustiche, sperando di avere sufficiente conoscenza sia tecnica che tecnologica, per poi arrivare a decidere come posizionarle. Molte volte ci si cimenta nella sonorizzazione di una sala senza avere le basi teoriche/tecniche per capire come fare in modo corretto. Non tutti sanno ad esempio che l'altoparlante, oltre ad essere l'ultimo anello della catena fonica, è anche quello più debole, quello che ha maggiore distorsione, maggiore rumore ed è il più complicato da orientare per tener conto delle differenze di fase che si possono creare tra più oggetti in un ambiente. In questo articolo si cerca di chiarire e dare una panoramica sui temi sopra elencati, ponendosi l'obiettivo di fornire le nozioni base per chi si vuole cimentare nella scelta del tipo di diffusione più adatta al contesto in cui deve e vuole lavorare.

* L'articolo è parte delle attività realizzate per la tesi proposta per la laurea specialistica in ingegneria di Alberto Ciprian: "Analisi e studio della diffusione sonora multicanale in ambienti chiusi. Studio e realizzazione di una stanza per l'ascolto surround". Tesi di Laurea Politecnico di Torino, 2010, sviluppata presso Centro Ricerche della Rai. Tutor Rai: dott. Leonardo Scopece.

2. Parametri e grandezze

2.1 Impedenza

L'impedenza rappresenta la grandezza elettrica assimilabile alla resistenza che complessivamente la bobina (*voice coil*) dell'altoparlante oppone al passaggio della corrente prodotta dall'amplificatore, quindi descrive la reazione elettrica dell'unità all'applicazione del segnale d'ingresso. Questa reazione dipende dalla frequenza del segnale applicato (nel caso di tono puro), oppure dalla frequenza di una certa componente (nel caso di segnale complesso). Conoscere questo parametro permette di rilevare, ad esempio, eventuali incompatibilità di funzionamento con elettroniche di amplificazione, oppure aiuta a scegliere il corretto schema di collegamento nel caso di utilizzo di più unità dello stesso tipo.

L'impedenza è una grandezza complessa, costituita da una parte reale, detta *resistenza*, e da una immaginaria, detta *reattanza*, la quale, a sua volta, è determinata da componenti induttive e capacitive variabili con la frequenza da riprodurre. Una diretta conseguenza dell'impedenza complessa consiste nello sfasamento tra la corrente entrante e la tensione applicata all'unità, che provoca fenomeni quali la *distorsione di fase*, e un funzionamento non ideale dell'amplificatore di potenza a cui l'unità è abbinata.

Sia il modulo dell'impedenza che l'argomento, sono variabili con la frequenza riprodotta e presentano solitamente un picco e un flesso in corrispondenza della frequenza di risonanza del sistema costituito da altoparlante e cassa (figura 1).

Fig. 1 - Andamento della curva di impedenza.

2.2 Risposta in frequenza

La risposta in frequenza corrisponde alla rappresentazione in forma grafica dell'andamento, al variare della frequenza, del livello di pressione sonora emesso dall'unità in un ambiente acusticamente adatto, a seguito dell'applicazione ai terminali dell'unità di un segnale sonoro di livello costante.

Una singola risposta in frequenza, tuttavia, non è sufficiente a descrivere in modo completo le prestazioni di una certa unità (indipendentemente dal fatto che si tratti di un'unità bassi, medi o alti). Infatti, la risposta in frequenza di una medesima unità varia più o meno sensibilmente a seconda della posizione di valutazione considerata, anche lasciando ogni altra condizione inalterata.

2.3 Sensibilità

La sensibilità può essere definita come il valore del livello del valore efficace della pressione sonora emessa da un'unità a seguito dell'applicazione ai suoi morsetti di un segnale sinusoidale con potenza pari a 1 W e a 1000 Hz.

Di norma, la sensibilità viene espressa in dB_{SPL} (*Sound Pressure Level*) utilizzando come livello di riferimento un valore di pressione sonora standard (20 μPa). La misura viene eseguita in camera anecoica o in campo libero alla distanza di un metro e ponendo lo strumento (normalmente il fonometro) in asse con l'altoparlante. La specifica del segnale è effettuata in termini di tensione e non di potenza conseguentemente al fatto che l'impedenza di un altoparlante non è costante ed è generalmente diversa dal valore

nominale. Tuttavia, il dato di sensibilità si indica tenendo come riferimento la potenza di 1 W; in tal caso, infatti, si ritiene implicitamente che la tensione di ingresso abbia un valore efficace di 0,35 V_{pp}.

In genere, secondo le normative internazionali, la sensibilità di una certa unità deve essere rilevata in assenza totale di superfici riflettenti, cioè in condizioni anecoiche o di spazio libero. Il termine inglese più diffuso è *full-space loading*.

2.4 Distorsione

La distorsione è un elemento fondamentale per qualunque tipologia di unità specializzata (*sub-woofer*, *woofer*, *middle*, *tweeter*). Solitamente si dice che un'unità genera distorsione quando confrontando il contenuto del segnale da riprodurre con quello del segnale riprodotto, si notano delle alterazioni.

Le alterazioni possono essere prodotte dalla comparsa di componenti sonore di frequenze non presenti in origine, o anche dalla variazione dei livelli o delle relazioni di fase tra le componenti del segnale da riprodurre. All'origine di questi comportamenti ci sono solitamente fenomeni di non linearità.

In un sistema di altoparlanti si considerano due tipi di distorsione:

- la distorsione armonica totale (THD)
- la distorsione da intermodulazione (IMD)

La distorsione armonica di un segnale comporta l'introduzione di componenti sonore spurie, multipli interi della frequenza della componente del segnale originario. Le componenti spurie vengono definite *armoniche di distorsione*, e a ciascuna di esse viene associato un numero detto ordine, che è dettato dal valore del multiplo che la lega alla componente originaria.

La distorsione da intermodulazione, invece, deriva da un processo di interazione tra coppie di componenti, di frequenza differente, del segnale audio da tradurre in suono. Ogni componente spuria viene denominata prodotto di intermodulazione.

2.5 Frequenza di risonanza

Quando un sistema elastico viene sottoposto a una sollecitazione oscillatoria, reagisce diversamente a seconda della frequenza della sollecitazione. In particolare, il sistema elastico comincia a oscillare alla stessa frequenza della sollecitazione quando questa è simile alla frequenza di risonanza del sistema. Ogni sistema elastico, infatti, ha una propria frequenza di risonanza.

A questo punto, si può considerare un altoparlante come un sistema elastico, che quindi possiede una propria frequenza di risonanza (ad esempio 40 Hz). Applicando all'altoparlante un segnale elettrico sinusoidale e variando la frequenza del segnale, si nota che fino a quando la frequenza del segnale non si avvicina a quella di risonanza dell'altoparlante, la membrana non è sollecitata. Quando, invece, ci si avvicina ai 40 Hz, la membrana comincia a oscillare alla stessa frequenza ed è possibile udire un suono uscire dall'altoparlante di frequenza pari alla frequenza del segnale elettrico applicato.

2.6 Potenza acustica

La potenza rappresenta una grandezza particolarmente importante per quanto riguarda la classificazione commerciale degli altoparlanti. Per questo motivo è possibile distinguere quattro tipologie di potenza:

- **Potenza Media**: calcolata in basse alle letture RMS della tensione.
- **Potenza Musicale**: determinata tramite l'utilizzo di un segnale di prova sinusoidale. Tuttavia utilizzare solo questo dato per verificare la compatibilità di un sistema di altoparlanti con un certo amplificatore può portare a un sottodimensionamento del sistema stesso.
- **Potenza di Picco**: calcolata basandosi sui valori di picco del segnale applicato. Corrisponde a circa il doppio della potenza media.
- **Potenza Continua**: corrisponde alla potenza che l'unità può sopportare a un tempo indeterminato. Si riferisce al fatto che alcuni standard, come l'AES2, prevedono che il segnale venga applicato per intervalli di tempo determinati.

2.7 Tenuta in potenza

Da un punto di vista operativo, la tenuta in potenza, o *power handling*, è un parametro fondamentale, in quanto rappresenta la capacità di una determinata unità di funzionare senza danneggiarsi ai regimi di amplificazione richiesti.

La procedura che permette di definirla, e riconosciuta a livello internazionale è quella indicata dalla norma EIA (*Electronic Industries Alliance*) RS-426B, soggetta a revisione periodica, nella quale viene specificato l'uso di un segnale di rumore rosa[Nota 1] limitato nella banda 40 Hz ÷1 kHz. Questo segnale viene applicato all'altoparlante in aria libera, privo di cassa acustica, per almeno otto ore e al termine della prova l'altoparlante non deve presentare danni significativi.

2.8 Parametri di Thiele & Small

I parametri di Thiele e Small sono valori elettromeccanici che definiscono le prestazioni a bassa frequenza di un *driver*[Nota 2]. Normalmente vengono pubblicati sulle schede tecniche, in quanto permettono al progettista di simulare la posizione, la velocità e l'accelerazione del diaframma, oltre che l'impedenza di ingresso e uscita di un sistema composto da altoparlante e *cabinet*[Nota 3].

I parametri più importanti sono:

- f_s: è la *frequenza di risonanza* in aria libera dell'altoparlante, espressa in Hz. Le oscillazioni del cono sono massime, se opportunamente eccitato, a questa frequenza. Il valore si può ricavare tramite la seguente relazione:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{ms} \cdot M_{ms}}}$$

  dove M_{ms} rappresenta la massa totale dell'altoparlante e C_{ms} la cedevolezza delle sospensioni.

- R_e: corrisponde al valore della *resistenza della bobina mobile* in corrente continua, misurabile con un preciso ohmetro, oppure rilevando il valore degli ohm dal modulo dell'impedenza a frequenza zero.

- R_{es}: è la *resistenza elettrica* dovuta agli attriti meccanici delle sospensioni dell'altoparlante.

- Q_{ms}: rappresenta il *fattore di merito meccanico* e si può calcolare tramite la relazione:

$$Q_{ms} = 2\pi \cdot f_s \cdot C_{ms} \cdot R_{es}$$

- Q_{es}: corrisponde al *fattore di merito elettrico* dell'altoparlante in aria libera, alla frequenza di risonanza:

$$Q_{es} = 2\pi \cdot f_s \cdot C_{ms} \cdot R_e$$

- Q_{ts}: è il *fattore di merito totale* dell'altoparlante in aria libera, alla frequenza di risonanza:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

- Z_{nom}: è l'*impedenza nominale*[Nota 4]. Rappresenta il valore di impedenza minima raggiunta nella curva caratteristica dell'altoparlante. Tale curva ha andamento irregolare: ha un picco in corrispondenza della frequenza di risonanza f_s, decresce progressivamente e quindi cresce di nuovo con l'aumentare della frequenza. Il valore di impedenza nominale è quello generalmente utilizzato per valutare il carico risultante ai morsetti dell'amplificatore a cui l'altoparlante verrà collegato.

- X_{nom}: corrisponde alla massima escursione lineare che il diaframma è in grado di compiere, senza riprodurre alcuna distorsione.

Nota 1 - rumore rosa, in inglese *pink noise*, è caratterizzato da una densità spettrale di potenza inversamente proporzionale alla frequenza: ad ogni ottava corrisponde l'identica quantità di potenza di rumore.
Nota 2 - Il termine inglese *driver* è utilizzato per individuare un singolo trasduttore, mentre *loudspeaker*, cioè altoparlante, indica il sistema complessivo, che può essere costituito da uno o più driver.
Nota 3 - termine inglese per indicare la cassa, contenitore dell'altoparlante.
Nota 4 - solitamente 4, 8 o 16 Ω.

3. Tipologie tecnologiche di altoparlanti

3.1 Magnetodinamici

Gli altoparlanti magnetodinamici rappresentano la tipologia maggiormente utilizzata nei sistemi di diffusione sonora. Sono caratterizzati da un magnete permanente che genera un campo magnetico nel quale è immersa una bobina mobile direttamente collegata al cono dell'altoparlante; ad essa viene applicato un segnale elettrico, opportunamente amplificato, il quale la fa muovere permettendo al cono di comprimere l'aria circostante e quindi di produrre un'onda sonora.

Funzionamento

Il motore dell'altoparlante, come detto, è formato da un magnete permanente, da un circuito magnetico e da una bobina mobile. Nelle quasi totalità dei trasduttori moderni, il magnete è di forma toroidale ed è posto esternamente rispetto alla bobina mobile. In passato veniva utilizzato come materiale l'Alnico, una lega di alluminio, nichel e cobalto; tuttavia, a causa dell'elevato costo delle leghe metalliche, attualmente si utilizzano magneti ceramici, oppure magneti in neodimio[Nota 5].

Il circuito magnetico è costituito da due piastre e da un polo centrale di materiale metallico, con lo scopo di incanalare le linee di forza del campo magnetico e assicurare un'intensa induzione magnetica nel traferro.

La bobina mobile è avvolta su un supporto cilindrico di materiale leggero, rigido e resistente al calore; leggero perché è parte della massa mobile del trasduttore, rigido perché deve trasmettere la forza della bobina alla membrana senza deformarsi, resistente al calore perché è a diretto contatto con la bobina che si riscalda per effetto Joule.

Nota 5 - metallo appartenente al gruppo delle "terre rare", o lantanidi, presente nella lega chiamata *mischmetal* fino al 18%. Ha un aspetto argenteo e lucente, tuttavia, essendo uno dei lantanidi più reattivi, si ossida rapidamente all'aria coprendosi di una patina di ossido che, desquamandosi, espone all'azione ossidante dell'aria nuovi strati di metallo fresco..

La bobina è composta da un conduttore isolato avvolto sul supporto e saldamente fissato ad esso per mezzo di adesivi ad alte temperature. Può essere realizzata in filo, in rame o alluminio a seconda del peso e delle caratteristiche richieste. Per generare la forza costante al variare della sua posizione nel traferro, deve avere un prodotto $B \cdot l$ costante, dove B rappresenta il campo magnetico e l la lunghezza della bobina. Questo è effetto si può ottenere con due geometrie:

- **Overhung**: in questa configurazione l'altezza della bobina h_{bm} è maggiore di quella del traferro h_{pp}. É il sistema più utilizzato per altoparlanti dedicati alle basse frequenze, perché permette buone escursioni e fattori di forza senza richiedere grandi magneti. In questo caso la massima escursione geometrica X_{max} è data da:

$$\frac{(h_{bm} - h_{pp})}{2}$$

  Quindi, a parità di fattore di forza, grandi escursioni richiedono una bobina di altezza maggiore (a scapito della leggerezza).

- **Underhung**: in questo caso, invece, l'altezza del traferro h_{pp} è maggiore dell'altezza della bobina h_{bm}. É il sistema più utilizzato per altoparlanti destinati alla riproduzione delle alte frequenze, poiché non richiedono alte escursioni. In questo caso, il parametro X_{max} è dato da:

$$\frac{(h_{pp} - h_{bm})}{2}$$

  Il vantaggio di questa soluzione consiste nel consentire un rendimento elettroacustico più elevato dato che tutte le spire sono concatenate con il flusso magnetico, tuttavia, presenta anche lo svantaggio di dover utilizzare magneti di grandi dimensioni e quindi il costo per la sua realizzazione risulta più elevato.

3.2 Elettrostatici

Gli altoparlanti elettrostatici sono principalmente caratterizzati dalla possibilità di utilizzare un campo elettrico al posto di quello magnetico. Il funzionamento tipico di questi altoparlanti si basa su una proprietà caratteristica dei condensatori, cioè la variazione di capacità che si ottiene variando la distanza di due lamine. Applicando quindi una tensione di frequenza variabile ai capi dell'altoparlante, la lamina mobile inizia ad essere attratta in funzione del valore di tensione applicato. Questo dispositivo ha anche il vantaggio di fermare la tensione continua di polarizzazione, avendo un'impedenza molto elevata per i segnali che servono a pilotarlo.

Funzionamento

Dal punto di vista tecnico, gli altoparlanti elettrostatici sono formati da tre elementi fondamentali, due statori[Nota 6] e una membrana (figura 2).

Fig. 2 - Componenti principali di altoparlante elettrostatico.

La membrana si muove all'interno degli statori sotto l'azione di un campo elettrico generato dagli statori stessi: è necessario, quindi, che gli statori siano di materiale conduttivo e, affinché non ostacolino la fuoriuscita del suono verso l'esterno, devono presentare un'abbondante superficie aperta. Per questo motivo sono in genere realizzati con una lamiera forata o una rete. La membrana è composta da una pellicola di materiale ad alta resistività, elastico, leggero e robusto.

Per valutare i vantaggi dell'utilizzo di un pannello elettrostatico nei confronti di un altoparlante tradizionale è necessario analizzarne il funzionamento. Innanzitutto, considero un sistema formato da uno statore e una membrana (figura 3).

Fig. 3 - Statore e membrana.

dove:

- ***d*** è la distanza tra lo statore e la membrana
- ***S*** è l'area dello statore (e per ipotesi anche della membrana)
- ***V*** è la tensione applicata tra lo statore e la membrana
- ***q*** è la densità di carica presente sulla membrana
- ***F*** è la densità di forza applicata alla membrana
- ***E*** è il campo elettrico presente all'interno dello spazio tra statore e membrana

Lo statore e la membrana costituiscono quindi un condensatore a facce piane e parallele, la cui capacità è data dalla relazione:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d}$$

dove ε_0 corrisponde alla costante dielettrica nel vuoto.

Nota 6 - in una macchina avente parti in movimento, lo statore è l'insieme delle parti fisse.

All'interno di questo condensatore è presente un campo elettrico, la cui intensità è data dal rapporto fra la tensione applicata alle armature e la distanza fra le armature stesse:

$$E = \frac{V}{d}$$

Il legame tra la carica accumulata nel condensatore e la tensione fra le armature è:

$$Q = C \cdot V = \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \cdot V$$

Quindi la densità di carica su ciascuna armatura vale:

$$q = \frac{Q}{S} = \varepsilon_0 \cdot \frac{V}{d}$$

Infine, poiché il prodotto fra la carica e l'intensità del campo elettrico in cui è immersa determina l'intensità della forza applicata alla carica stessa, si ha che

$$F = q \cdot E = \varepsilon_0 \cdot (V/d)^2$$

q è la densità di carica sulla membrana e F è la densità di forza applicata alla membrana.

Quindi, la forza complessiva agente sulla membrana è data dal prodotto tra la densità di forza e la superficie complessiva della membrana:

$$F_{tot} = F \cdot S$$

Da queste considerazioni emerge un primo elemento importante: la forza che muove la membrana è applicata in modo uniforme su tutta la superficie della membrana stessa, quindi al crescere delle dimensioni aumenta anche la forza.

Tuttavia è da notare che una struttura formata da un pannello elementare, come quella appena descritta, non si può utilizzare in pratica a causa della deformazione della membrana a riposo. E' necessario infatti che la membrana a riposo si trovi in una posizione intermedia che le consenta il massimo spostamento senza però toccare l'armatura. Ma la posizione della membrana è connessa con il valore della tensione applicata, che dipende dall'elasticità della membrana e che, a sua volta, dipende da quanto viene tesa la pellicola in fase di costruzione.

Inoltre, va considerato il fatto che siccome il campo elettrico si sviluppa soltanto tra la membrana e lo statore, una variazione della distanza ne provoca una forte variazione, provocando un funzionamento non lineare e una forte distorsione del suono riprodotto.

Per questi motivi è necessaria una soluzione basata su un doppio statore. In questo modo, la membrana a riposo si mantiene nella posizione intermedia fra gli statori e la dipendenza del campo elettrico dalla posizione della membrana viene ridotta. Quindi, a riposo ai due statori deve essere applicata la stessa tensione di polarizzazione, e il segnale audio deve agire variando le tensioni sugli statori in quantità uguali e opposte.

Ripetendo l'analisi precedente si ottiene che la densità dei carica depositata sulla membrana vale:

$$q = 2\,\varepsilon_0 \cdot \frac{V_p}{d}$$

e la densità di forza applicata alla membrana vale:

$$F = q \cdot E_s = 2\,\varepsilon_0 \frac{V_p}{d} \cdot \frac{V_s}{d}$$

dove V_p è la tensione di polarizzazione e ***Vs*** è la tensione "audio". Queste due tensioni si possono applicare come nello schema di figura 4.

Infine, è da notare che la carica depositata sulla membrana non deve variare durante il movimento della membrana stessa, altrimenti si ottiene un comportamento non lineare

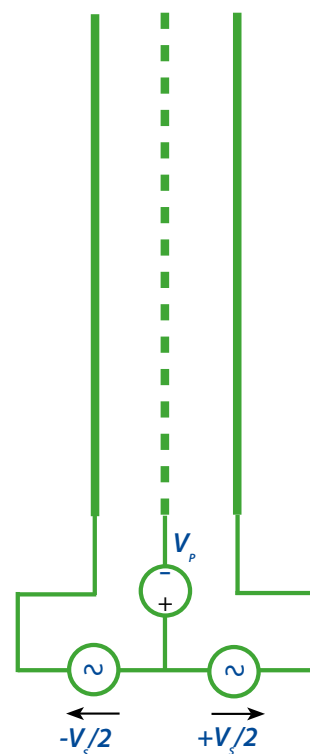



Fig. 4 - Tensioni applicate.

a causa del fatto che il legame tra forza, carica e campo elettrico subisce grandi variazioni durante il passaggio da una posizione all'altra. Per questo motivo, la cosa migliore è che la membrana abbia una resistività elevata.

3.3 Piezoelettrici

Questo tipo di altoparlante sfrutta la proprietà di alcuni materiali di entrare in vibrazione quando vengono percorsi da corrente elettrica. La piezoelettricità viene quindi utilizzata per convertire il segnale elettrico in onde acustiche. La frequenza della vibrazione è correlata alla frequenza della corrente applicata e in questo modo viene riprodotto il suono trasportato dal segnale elettrico.

La struttura è rappresentata in figura 5.

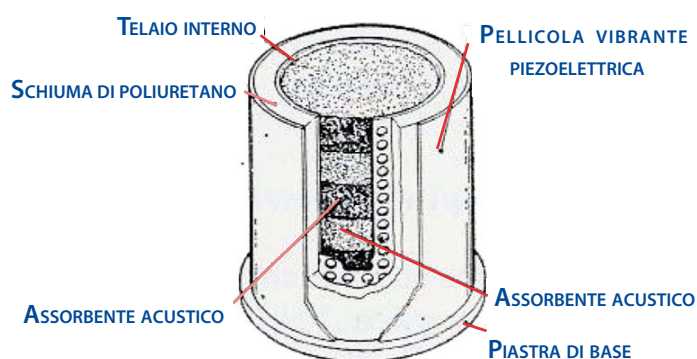



Fig. 5 - Struttura.

Questi altoparlanti sono caratterizzati da un'elevata efficienza e impedenza. Per questo motivo, sono adatti per la realizzazione di matrici di altoparlanti composte da un elevato numero di elementi che, collegati in parallelo, offrono in blocco un'efficienza analoga a quella dei comuni altoparlanti elettrodinamici. Inoltre, gli altoparlanti piezoelettrici sono in grado di riprodurre frequenza molto elevate e per questo vengono impiegati soprattutto come tweeter.

Alcuni materiali piezoelettrici utilizzabili come "motore" di un altoparlante sono:

- Sale di Rochelle
- Titanato di Bario
- Zirconato di Piombo
- Film polimerici

4. Unità specializzate: gamma di frequenze dedicata

In un sistema di altoparlanti le unità specializzate rappresentano una parte fondamentale, in quanto sono in grado di fornire prestazioni soddisfacenti limitatamente alla riproduzione dei suoni appartenenti a una specifica gamma di frequenze.

Le unità specializzate si possono classificare in tre categorie:

- ***woofer***: specializzati nella riproduzione di suoni di bassa frequenza, dal limite inferiore della banda udibile (20 Hz) fino a frequenze di poche centinaia di hertz
- ***mid-range***: specializzati nella riproduzione di suoni di media frequenza, da qualche centinaia di hertz fino a un limite superiore di poche migliaia di hertz
- ***tweeter***: specializzati nella riproduzione di suoni di alta frequenza, da poche migliaia di hertz fino al limite superiore della banda udibile (20 kHz)

Tuttavia, è da sottolineare che queste tre categorie possono essere estese per i componenti in grado di riprodurre suoni sotto i 20 Hz e sopra i 20 kHz; si aggiungono quindi anche i subwoofer e i super-tweeter.

4.1 Composizione delle unità specializzate

L'elemento centrale di ogni unità specializzata è l'altoparlante. Ogni altoparlante riceve in ingresso un segnale audio amplificato e il conseguente movimento del diaframma determina variazioni istantanee della pressione circostante, che l'orecchio percepisce come suono.

Tutte le unità sono caratterizzate anche da un secondo elemento che non si può considerare come secondario: la cassa. Il suo ruolo è legato all'esigenza di ottenere risultati precisi in termini di risposta elettroacustica dell'unità specializzata. Ad esempio, in un'unità con altoparlante magnetodinamico montato in una cassa chiusa ermeticamente (figura 6), il mobile, che contiene all'interno materiale fibroso, ha la funzione di assorbire al meglio la radiazione posteriore del driver, al fine di prevenire il *cortocircuito acustico*[Nota 7]. Un'unità specializzata che prevede un simile abbinamento driver-cassa viene definita a sospensione pneumatica, o *closed box*.

Fig. 6 - Struttura driver mobile a cassa chiusa.

Un altro possibile abbinamento driver-cassa prevede che la cassa non sia completamente chiusa e che, invece, presenti una o più aperture per il recupero in fase di una porzione di interesse della radiazione posteriore dell'altoparlante (figura 7).

Le due possibili configurazioni descritte fanno parte della categoria dei sistemi di trasduzione a *radiazione diretta*, poiché la membrana del driver si affaccia direttamente sull'ambiente da sonorizzare.

Nota 7 -fenomeno che provoca un drastico peggioramento delle prestazioni alle frequenze più basse.

Fig. 7 - Struttura driver mobile a cassa aperta.

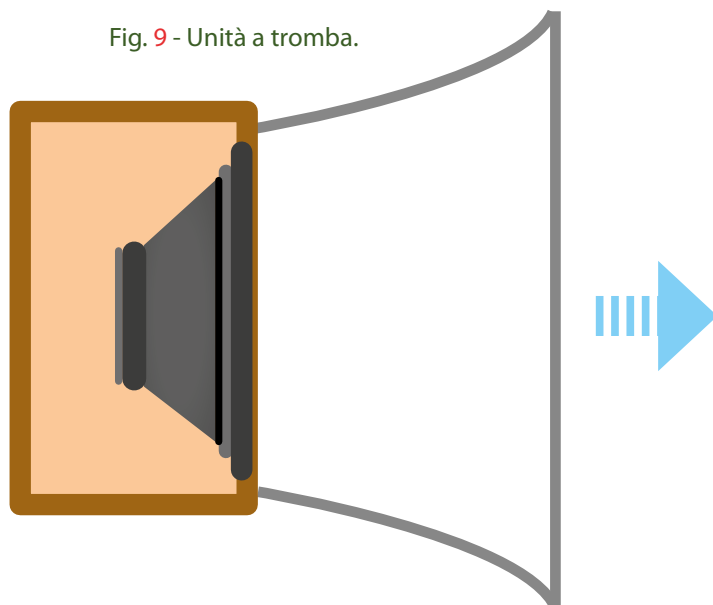
Da qui si deduce, quindi, che i sistemi a *radiazione indiretta* prevedono, invece, una sorta di anticamera tra altoparlante e ambiente da sonorizzare. Un esempio di questa categoria è l'unità bassi di tipo *passabanda* (figura 8), nella quale il woofer è montato internamente al mobile su una parete che delimita due camere che possono essere entrambe aperte ed eventualmente dotate di un "condotto di accordo"; in questo caso si parla di unità *a doppio carico reflex*.

Fig. 8 - Unità in cassa passa-banda o a doppio carico reflex.

Un altro esempio di sistema a radiazione indiretta è l'unità a tromba (figura 9), in cui la radiazione frontale del driver viene guidata verso l'ambiente da sonorizzare da un condotto a sezione crescente, detto tromba, mentre la radiazione posteriore arriva in un volume chiuso in modo da essere annullata.

Un'unità specializzata può prevedere anche l'impiego di più driver dello stesso tipo e può contenere all'interno una rete di filtraggio passiva, costituita da induttori e condensatori, interposta tra altoparlanti e ingresso dell'unità specializzata. Le reti di filtraggio utilizzate sono:

- ***filtri passa-basso***: consentono il transito con una minima attenuazione dei componenti di segnale di frequenze inferiori alla frequenza di taglio
- ***filtri passa-alto***: consentono il transito con una minima attenuazione dei componenti di frequenza superiori alla frequenza di taglio
- ***filtri passa-banda***: consentono il transito con una minima attenuazione dei componenti di frequenza appartenenti a un certo intervallo di frequenze delimitato inferiormente dalla frequenza di taglio inferiore e superiormente dalla frequenza di taglio superiore

Fig. 9 - Unità a tromba.

4.2 Il circuito di crossover

Il circuito di crossover rappresenta un componente necessario in sistemi che utilizzano vari tipi di unità a seconda della frequenza. Sono composti da filtri che hanno il compito di suddividere il segnale in ingresso in più segnali che coprono, ognuno, una banda di frequenza. Ad esempio, un circuito di crossover a tre vie (figura 10) genera tre segnali: uno contenente le basse frequenze per il woofer, uno le medie frequenze per il mid-range, e uno le alte frequenze per il tweeter.

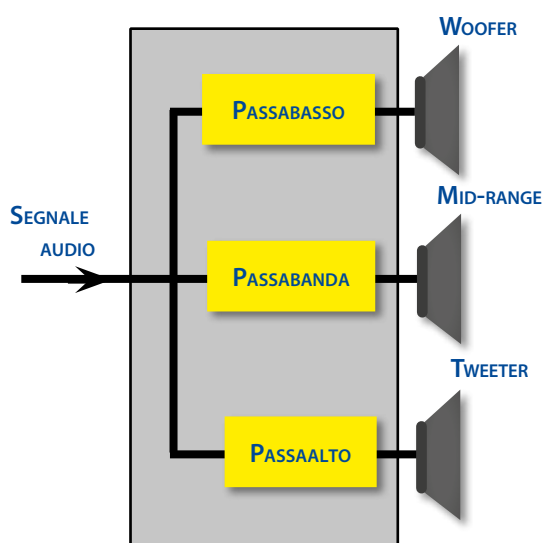



Fig. 10 - Crossover a tre vie.

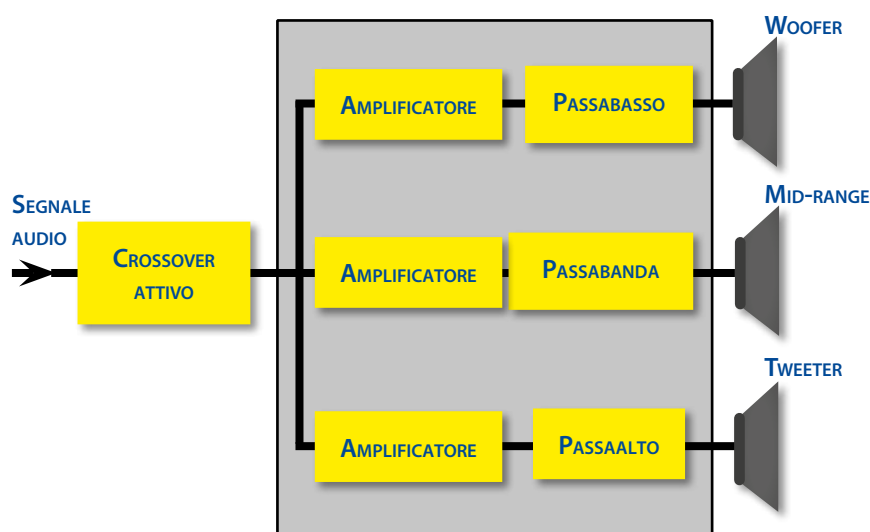
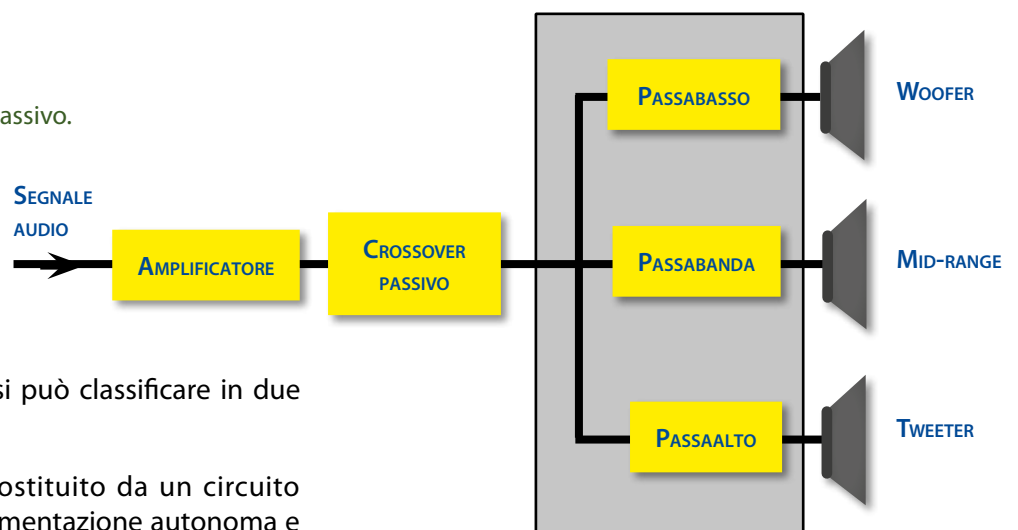



Fig. 11 - Crossover attivo.

Fig. 12 - Crossover passivo.

Segnale audio
Amplificatore
Crossover passivo
Passabasso
Passabanda
Passaalto
Woofer
Mid-range
Tweeter

Un circuito di crossover si può classificare in due categorie:

- ***crossover attivo***: è costituito da un circuito attivo dotato di un'alimentazione autonoma e interviene sul segnale prima che questo venga amplificato. In questo modo, all'uscita si hanno tre segnali (nel caso di crossover a tre vie), ognuno dei quali con la propria composizione in banda, che verranno successivamente amplificati separatamente (figura 11).
- ***crossover passivo***: in questo caso il segnale arriva al crossover dopo essere stato amplificato (figura 12). Usando un solo amplificatore, il crossover non ha la necessità di essere alimentato. Questa soluzione è la più economica, ma presenta lo svantaggio di offrire una qualità minore in quanto presuppone l'uso di un solo amplificatore per l'intera banda dello spettro udibile e, quindi, anche un'amplificazione approssimativa del segnale.

5. Unità per la gamma di frequenza bassa

L'unità bassi è un sistema elettroacustico specializzato nella riproduzione di suoni di bassa frequenza nell'ambito di un intervallo compreso da un limite inferiore di 20÷50 Hz fino a un limite superiore di poche centinaia di hertz, e può essere costituito da uno o più altoparlanti accoppiati posteriormente a un volume aperto o chiuso, con una struttura a radiazione diretta o indiretta.

A causa della particolare collocazione in frequenza, in relazione alle caratteristiche percettive del sistema uditivo, a queste unità è richiesto di produrre elevate pressioni sonore per poter avere un livello di ascolto in linea con quello delle unità destinate alle medie e alte frequenze, alle quali ne bastano di meno.

5.1 Woofer

Un woofer (figura 13) è un tipo di altoparlante destinato alla riproduzione delle basse frequenze, tipicamente tra 40 Hz e pochi kHz. Solitamente la struttura corrisponde a quella di un driver elettrodinamico, con la caratteristica principale di avere peso e dimensioni superiori alle altre tipologie di altoparlante.

Dal punto di vista tecnico, la struttura interna è costituita da un cono di diametro sufficientemente largo, da una bobina in filo di rame e da un grande magnete in grado di fornire il flusso magnetico necessario per gli spostamenti assiali della bobina solidale al cono.

Il cono può essere realizzato con diverse tipologie di materiale, come: carta, resine plastiche o leghe metalliche.

Fig. 13 - Woofer.

5.2 Subwoofer

Il subwoofer (figura 14) è il componente destinato alla riproduzione dei suoni a bassissima frequenza, appartenenti cioè a una gamma di frequenze compresa tra 20 Hz e 200 Hz. A causa della gamma di frequenze limitata, la maggior parte dei subwoofer viene usata per aumentare la produzione degli altoparlanti che coprono le bande di frequenza più alte.

A livello tecnico, i subwoofer, utilizzano coni di 10-12 pollici di diametro e la necessità di queste dimensioni deriva dal fatto che le basse frequenze implicano un grande spostamento d'aria. L'alimentazione arriva tramite un amplificatore e la frequenza a loro dedicata viene tagliata dal circuito di crossover che assicura il fatto che le medie e le alte frequenze non arrivino al subwoofer stesso.

6. Unità per la gamma di frequenza medio-alta

L'unità per la riproduzione della gamma di frequenza medio-alta è un sistema elettroacustico specializzato nella riproduzione di suoni di frequenza nell'intervallo compreso da un limite qualche centinaia di hertz fino al limite superiore della banda dell'udito che corrisponde a 20 kHz. Un'unità di questa categoria è comunemente formata da almeno una coppia di altoparlanti: uno destinato alla riproduzione della gamma media, il mid-range, e uno destinato alla riproduzione della gamma acuta, il tweeter.

Fig. 15 - Mid-range.

Fig. 14 - Subwoofer.

6.1 Mid-range

I mid-range (figura 15) sono i componenti in grado di riprodurre una gamma di frequenze compresa tra 300 Hz e 8 kHz (intervallo in cui è compresa la voce umana), e si presentano generalmente con struttura a cono o cupola.

I materiali più utilizzati per la realizzazione sono, ad esempio, il tessuto Kevlar, le fibre di carbonio e le leghe di metalli leggeri a base di alluminio, magnesio e titanio. La superficie radiante di un mid-range a cupola è, in genere, una sezione di 90 gradi di una sfera, realizzata in metallo o film plastico, con la sospensione e la co-bobina situata sul bordo esterno della cupola.

6.2 Tweeter

Il tweeter è un componente dedicato alla riproduzione delle alte frequenze, solitamente dai 5÷8 kHz ai 20 kHz (alcuni sono in grado di arrivare fino a 45 kHz).

Dal punto di vista tecnico sono dispositivi elettrodinamici formati da una bobina sospesa in un campo magnetico. Elettrificando la bobina è possibile generare un campo magnetico variabile, che lavora in opposizione al campo magnetico fisso, costringendo la bobina e il diaframma ad essa collegato a muoversi. Siccome la bobina e il diaframma sono collegati insieme, i movimenti producono movimenti d'aria che permettono di riprodurre i suoni acuti.

I tweeter moderni si differenziano abbastanza rispetto alle versioni precedenti, le quali erano di solito piccole versioni di woofer, e ovviamente anche i componenti interni si sono sviluppati notevolmente. Ad esempio i diaframmi di molti tweeter a cupola sono termoforati da film di poliestere impregnati con una resina polimerica.

Fig. 16 - Tweeter a cupola.

Per quanto riguarda i materiali, vengono maggiormente utilizzati l'alluminio, il titanio, il magnesio e il berillio, essendo leggeri e rigidi, ma con basso smorzamento. Inoltre presentano una risonanza sopra i 20 kHz. Talvolta, vengono utilizzato materiali meno diffusi come, ad esempio, il diamante sintetico, avendo un'estrema rigidezza, ma anche fogli di polietilene e tessuti di seta.

Esistono diverse tipologie di tweeter, di seguito vengono descritte le principali.

Tweeter a cupola

I tweeter a cupola (figura 16) sono realizzati collegando una bobina a una cupola, realizzata con un metallo sottile, agganciata ad un magnete e presentano una piastra frontale. Normalmente vengono classificati in base al diametro della bobina, che varia tra 19 mm e 38 mm (la tipologia più diffusa misura 25 mm).

Fig. 17 - Tweeter a cono.

Tweeter a cono

La struttura di questo tipo di tweeter è molto simile a quella di un woofer, ma ottimizzata per lavorare alle alte frequenze (figura 17). Le caratteristiche principali consistono in un cono piccolo e leggero, in modo da potersi muovere velocemente, e in sospensioni più rigide, in quanto per riprodurre le alte frequenze è necessaria una rigidità maggiore. I materiali utilizzati sono abbastanza rigidi (come la ceramica) e presentato uno smorzamento buono.

Tweeter piezoelettrico

Questa tipologia di tweeter (figura 18) è caratterizzata dal fatto di contenere un cristallo piezoelettrico accoppiato a un diaframma meccanico. Se si applica un segnale audio al cristallo, questo risponde flettendosi in modo proporzionale alla tensione applicata alle superfici del cristallo. L'elemento attivo è il cuore del trasduttore, in quanto serve a convertire l'energia elettrica in energia acustica, ed è costituito da un materiale polarizzato, con elettrodi collegati a due delle facce opposte. Applicando un campo elettrico, le molecole polarizzate si allineano con esso, con la conseguente induzione dei dipoli all'interno della struttura molecolare, o cristallina, del materiale. Inoltre, viene aggiunto un materiale permanentemente polarizzato, come il titanato di Bario ($BaTiO_3$), che produce un campo elettrico quando cambiano le dimensioni del materiale a seguito di una forza meccanica. Questo è quello che viene definito effetto piezoelettrico.

Fig. 18 - Tweeter piezoelettrico.

Tweeter a nastro

I tweeter a nastro (figura 19) utilizzano una membrana sottile (come l'alluminio), che supporta una bobina planare sospesa in un campo magnetico per riprodurre le alte frequenze. Il nastro è composto di materiale molto leggero e quindi capace di accelerazioni molto forti e di una risposta in frequenza elevata. I nastri solitamente non hanno un grande rendimento, tuttavia le versioni di tweeter con potenza elevata stanno diventando comuni in sistemi di amplificazione con struttura *line-array*.

Tweeter a tromba

Questi tweeter (figura 20) sono realizzati utilizzando una delle tipologie di tweeter precedentemente illustrata agganciata a una struttura a tromba. Quest'ultima permette, infatti, di controllare la dispersione e aumentare l'efficienza. Più è grande la tromba e minore è la frequenza con cui si può lavorare.

Fig. 19 - Tweeter a nastro.

Fig. 20 - Tweeter a tromba.

Plasma Tweeter

Il tweeter al plasma invece di impiegare una membrana mobile (come i classici altoparlanti), diffonde delle onde di pressione generando un plasma mediante una scarica che attraversa l'aria. Il plasma generato dalla scarica è composto da ioni ed è caratterizzato da una massa e una densità diversa da quella dell'aria fredda che circonda la scarica: modulando le dimensioni della scarica, si ottiene lo spostamento del fronte fra aria fredda e plasma. In virtù della differenza di densità, lo spostamento del confine aria-plasma provoca uno spostamento della stessa aria e, di conseguenza, si originano le onde di pressione responsabili della diffusione del suono.

Questo è il tweeter dalla tipologia più complessa e offre il vantaggio di realizzare un diaframma molto sensibile al segnale d'ingresso. Tuttavia presenta due svantaggi: ha un rendimento piuttosto basso nel caso in cui non venga accoppiato a una tromba e produce ozono, che è un gas tossico.

6.3 Super Tweeter

Il super-tweeter è il componente dedicato alla riproduzione delle frequenze superiori alla gamma di frequenze riprodotte da un normale tweeter. Viene utilizzato per ricreare un campo sonoro realistico, integrando il suono del tweeter e riproducendo le frequenze che il tweeter può riprodurre soltanto con una forte distorsione.

Un Super-Tweeter è generalmente destinato a rispondere bene alle frequenze fino ai 20 kHz, che rappresentano il limite superiore della gamma di frequenze percepite dall'orecchio umano, arrivando fino a 100 kHz.

7. Altoparlanti per applicazioni particolari

Spesso capita di trovarsi in situazioni in cui è richiesta una particolare tipologia di diffusione sonora legata a standard specifici o più semplicemente alla volontà di ottenere risultati soddisfacenti in termini di copertura, pressione sonora e di emissione in direzioni desiderate. Per questi motivi, esistono sul mercato altoparlanti specifici per la quasi totalità delle applicazioni.

7.1 Cinema

La realizzazione dell'impianto di diffusione acustica nelle sale cinematografiche è regolata dalla normativa ISO-SMPTE 2969, che prevede l'utilizzo di tre diverse unità di altoparlanti: un'unità full-range a due/tre vie per i canali retroschermo, un subwoofer per la riproduzione delle basse frequenze e un'unità full-range a una/due vie per l'effetto surround.

Fig. 21- Unità retroschermo a tre vie.

La prima unità è realizzata accoppiando un'unità di medio-bassi a radiazione diretta con un'unità a tromba (figura 21). Solitamente viene posizionata molto vicino a un pannello collocato dietro lo schermo, in modo da confinare l'emissione lungo una sola direzione.

Per quanto riguarda il subwoofer, il suo compito consiste nella riproduzione degli effetti a bassa frequenza, arrivando, in termini di banda passante, fino a 120 Hz e riproducendo le frequenze al limite della gamma audio con un adeguato livello di pressione sonora.

Per quanto riguarda le unità full-range dedicate al surround, bisogna evidenziare il fatto che nei normali sistemi surround analogici[Nota 8] il segnale è inviato al canale surround a banda ristretta fino a 7 kHz, mentre in quelli digitali[Nota 9] la gamma del canale surround è intera, quindi le unità altoparlanti per il surround sono realizzate utilizzando un sistema a due vie a radiazione diretta anche per il tweeter, che solitamente è a cupola.

7.2 Studi e regie

Le unità altoparlanti utilizzate negli studi di registrazione e nelle regie audio, dette monitor, si distinguono dalle altre tipologie grazie alla caratteristica di avere una risposta in frequenza costante su tutta l'estensione della gamma audio e avere una bassa distorsione, anche in presenza di livelli alti di pressione sonora.

Dal punto di vista costruttivo, i monitor sono caratterizzati dalla possibilità di includere l'amplificazione. Vengono, quindi, definite "unità attive". Inoltre, il fatto di avere l'amplificazione interna, garantisce anche un'ottimizzazione del rendimento energetico del sistema consentendo il raggiungimento di pressioni sonore elevate.

7.3 Grandi sonorizzazioni

Il trattamento acustico dei grandi ambienti, come palazzetti o aree outdoor, necessita di una strumentazione particolare e soprattutto di una configurazione ad hoc dei singoli componenti in base al tipo di applicazione.

In questi casi, solitamente, si utilizzano le cosiddette unità *Line Array* (figura 22), costituite da schiere verticali di altoparlanti, seguendo, con le dovute proporzioni, il modello dei diffusori verticali presenti in ambienti come le chiese.

La direttività di ogni altoparlante varia in base alla frequenza, ad esempio, un altoparlante da 15" alle basse frequenze si comporta come omnidirezionale e la sua direttività aumenta in modo proporzionale con la frequenza. Posizionando gli altoparlanti uno sopra l'altro e pilotandoli con lo stesso segnale, si ottiene un particolare tipo di direttività: si creano infatti due tipi di zone, una in asse, dove si verifica un'interferenza costruttiva favorendo anche l'aumento di pressione sonora di 6 dB, e una fuori asse che provoca la cancellazione con la conseguente diminuzione della pressione sonora. L'interferenza distruttiva prende il nome di *combing*[Nota 10], in quanto le cancellazioni si verificano in modo regolare lungo l'asse delle frequenze.

Nota 8 - Dolby Stereo.
Nota 9 - Dolby SR-D, DTS.
Nota 10 - da comb, pettine in inglese.

Fig. 22 - Esempio di Line Array.

La struttura *Line Array* fa in modo che le interferenze costruttive si verifichino dentro l'asse della schiera, mentre quelle distruttive siano rivolte verso i lati. E' da notare che in questo tipo di struttura, il *combing* non viene considerato come un elemento negativo, in quanto viene sfruttato per ottenere direttività di emissione sul piano verticale. Quindi si ottiene una diffusione maggiormente direttiva in verticale, mentre sul piano orizzontale l'apertura rimane la stessa di ciascun diffusore.

Un altro parametro da considerare è la distanza tra gli altoparlanti affinché il *Line Array* funzioni. La distanza massima fra i centri acustici degli altoparlanti non dovrebbe superare la lunghezza d'onda della frequenza più alta che si vuole direzionare. Il risultato migliore si ottiene però considerando come distanza un quarto della lunghezza d'onda, ma spesso ci sono limiti di tipo costruttivo.

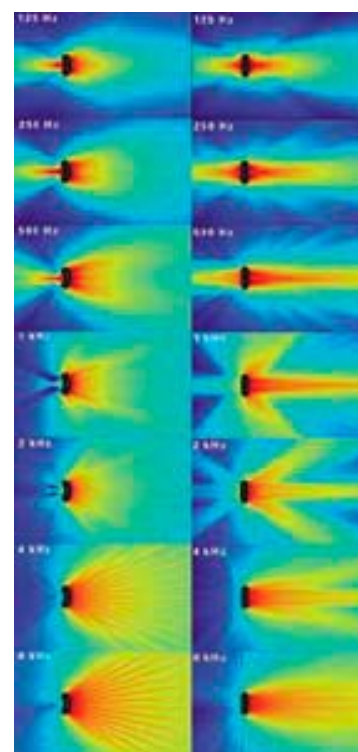



Fig. 23 - Direttività dei *Line Array*.

La forma del fronte d'onda si può quindi considerare come una porzione di cilindro. Questo, presenta il vantaggio di diffondere l'energia in maniera molto più direttiva, su una superficie ridotta rispetto a un fronte d'onda sferico. Infatti, un'onda a porzione sferica risponde alla legge del quadrato inverso, secondo cui la pressione sonora diminuisce di 6 dB per ogni raddoppio della distanza percorsa. Invece, l'onda cilindrica perde soltanto 3 dB di pressione acustica fino a che rimane a una certa distanza dal punto di emissione detta campo vicino, o zona di Fresnel, oltre entra in campo lontano, o zona di Fraunhofer, all'interno del quale l'onda diventa sferica e inizia a perdere 6 dB per la legge citata in precedenza. Il passaggio tra le due zone dipende da due parametri: la lunghezza della schiera e la frequenza riprodotta. La relazione che consente di calcolare la distanza di transizione tra le due zone è:

$$d = \frac{3}{2} \cdot l^2 \cdot f \sqrt{1 - \frac{1}{3 \cdot l \cdot f}}$$

dove l è la lunghezza dell'array e f la frequenza.

V-DOSC

Il sistema V-DOSC, di Christian Heil, ha rappresentato un notevole passo avanti per questo tipo di struttura, in quanto ha contribuito a risolvere il problema della riproduzione delle alte frequenze; creando un *line-array* valido per il *sound reinforcement*. Nella relazione presentata alla *Convention AES* nel 1992, venivano evidenziati i due princìpi su cui basava la *Wavefront Sculpture Technology* (WST), studiata sin dal 1988 da Heil insieme al Marcel Urban: un insieme di sorgenti sonore individuali disposte con passo regolare su una superficie continua, piana o curva, è equivalente a una singola sorgente sonora avente le stesse dimensioni del totale dell'insieme se si verifica almeno una delle seguenti condizioni:

- i fronti d'onda generati da sorgenti individuali sono planari e la superficie della sorgente sonora occupa almeno l'80% dell'intera superficie
- lo *step*, parola inglese corrispondente a passo, definito come la distanza fra i centri acustici delle sorgenti individuali, è più piccolo di metà della lunghezza d'onda di tutte le frequenze sopra la larghezza di banda a cui si opera

La parte più importante dell'impianto è proprio la guida d'onda in grado di creare un'onda cilindrica anche sulle alte frequenze, cosa impossibile da ottenere col semplice accoppiamento dei driver. La guida d'onda (figura 24) è formata da un condotto che separa-raccoglie le onde prodotte da un driver a compressione da 1,4" e, dopo un preciso percorso, le diffonde perfettamente in fase tramite una stretta fessura rettangolare, simulando in pratica il comportamento di un driver a nastro. Questa guida d'onda fa sì che la diffusione delle alte frequenze soddisfi la prima delle condizioni del WST.

Le frequenze basse e medio-alte vengono invece riprodotte con l'applicazione della seconda condizione, infatti, lo step fra i due altoparlanti 15" è di 75 cm. con un taglio di crossover a 200 Hz, mentre i centri dei due 7" distano 17 cm e sono tagliati a 1300 Hz; le frequenze dai 1300 Hz in su sono poi riprodotte dalla guida d'onda.

7.4 Ambienti altamente riverberanti

La realizzazione di sistemi di diffusione in ambienti molto riverberanti risulta spesso molto difficile. Questo a causa del fatto che in questo tipo di ambienti vanno considerati due elementi principali: la geometria delle strutture che li compongono e la tipologia di materiali, i quali incidono su un fattore fondamentale come l'intelligibilità. Basti pensare a luoghi come chiese e palestre, in cui spesso non viene effettuato un corretto trattamento acustico in fase di progettazione e il più delle volte l'intelligibilità del parlato è scarsa.

L'intelligibilità del segnale dipende dalla differenza in livello sonoro del segnale e il rumore di fondo ambientale a ciascuna frequenza dello spettro da 250 Hz e 4 kHz. Quando in una gamma di frequenze il livello sonoro viene sommerso dal rumore ambientale di fondo, per l'ascoltatore inizia la confusione! Per un ascolto corretto è necessario che il segnale arrivi in un tempo massimo di 50 ms, per cui il suono riflesso dalle superfici deve arrivare all'incirca con 30 ms di ritardo dal segnale diretto all'ascoltatore stesso (ritardi maggiori o uguali a 50 ms provocano una sensazione negativa di isolamento).

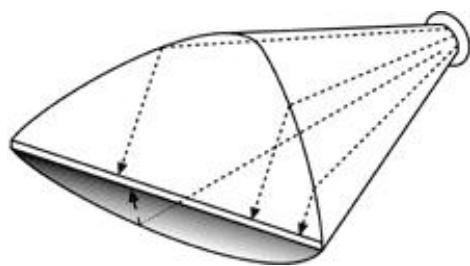



Fig. 24 - Guida d'onda.

Esempio: le chiese

Le chiese rappresentano una caso tipico di ambiente altamente riverberante. Per la loro progettazione acustica quindi è necessario tener conto inizialmente delle caratteristiche di assorbimento dei materiali interni. I materiali più utilizzati sono principalmente marmi e intonaci, i quali presentano un coefficiente di assorbimento molto basso, favorendo quindi le riflessioni. Inoltre, è opportuno considerare anche la struttura e le dimensioni dell'ambiente, che molto spesso provoca lunghi percorsi delle onde sonore riflesse, le quali, giungendo all'ascoltatore con grande ritardo, possiedono ancora molta energia, provocando un notevole campo riverberato.

Il sistema di diffusione sonora gioca quindi un ruolo fondamentale e quindi è opportuno scegliere in modo corretto i diffusori, poiché da essi dipende la modalità di formazione del campo sonoro. In base alla struttura dell'ambiente, gli altoparlanti più utilizzati sono i diffusori in linea (detti più comunemente diffusori a colonna - figura 25).

L'elevata direttività permette di massimizzare il rapporto tra suono diretto e riverberato, mentre la forma allungata verticalmente consente la collocazione lungo le colonne. Diffusori adatti a questi scopi sono i modelli digitali, che possono essere controllati da

Fig. 25 - Esempio di diffusore verticale.

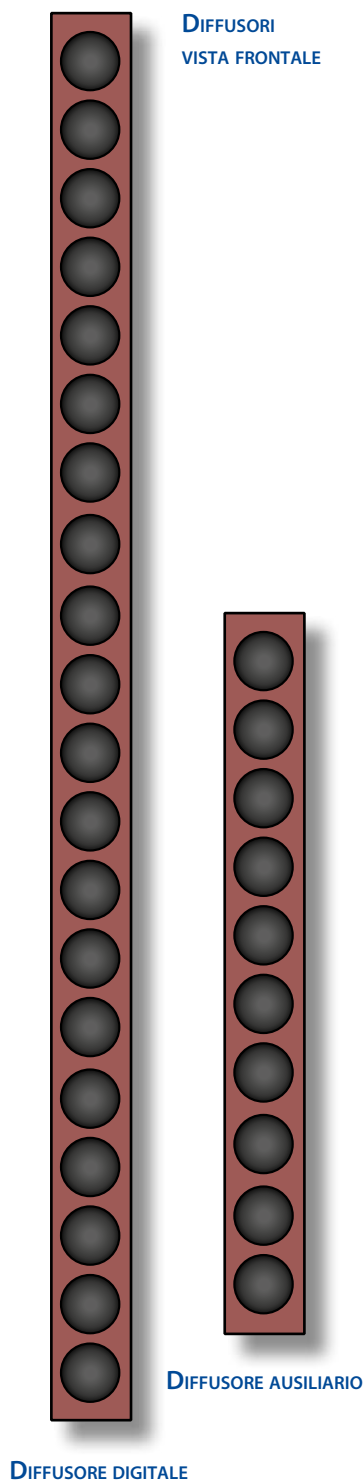



Fig. 26 - Schema del diffusore.

un mixer. Questi possiedono un certo numero di altoparlanti in linea (figura 26) pilotati internamente da un DSP (*Digital Signal Processor*) che permette di controllare il campo sonoro generato in modo da adattarlo alle caratteristiche acustiche dell'ambiente. Il controllo digitale di questi sistemi favorisce anche il controllo della direttività orientando l'emissione sonora senza dover inclinare il diffusore, garantendo una grande area di copertura. In questo modo è possibile sonorizzare grandi ambienti utilizzando un numero ridotto di diffusori collocati in posizione verticali e integrati con l'architettura. Grazie alla gestione digitale della direttività, l'energia sonora emessa dal diffusore viene concentrata sull'area di ascolto estendendo la profondità di copertura e riducendo il riverbero.

Tuttavia, per una corretta progettazione è necessario considerare anche il posizionamento e la scelta dei microfoni, che oltre ad essere poco sensibili, devono possedere alta direzionalità per ridurre l'accoppiamento con il campo riverberato. Tra le funzioni di elaborazione del segnale è anche necessario un dispositivo per la soppressione delle risonanze dovute all'accoppiamento tra diffusori e microfoni (*effetto Larsen*[Nota 11]).

In questo tipo di ambienti risulta fondamentale il calcolo del tempo di riverberazione T_{60}. Nel caso di una chiesa, il coefficiente di assorbimento medio dei materiali equivale solitamente a 0,05 per le frequenze comprese tra 125 Hz e 1 kHz, mentre per le frequenze superiori vale circa 0,1.

In base alle precedenti considerazioni, è opportuno limitare al minimo l'energia nella direzione del soffitto e delle pareti, concentrandola invece sul piano di ascolto. In questo modo, il rapporto tra campo diretto e campo riverberato risulta massimizzato, consentendo un ascolto chiaro anche in condizioni acustiche difficoltose.

Nota 11 - L'effetto Larsen è il tipico fischio stridente che si sviluppa quando i suoni emessi da un altoparlante ritornano ad essere captati con sufficiente "potenza di innesco" da un microfono e da questo rimandato al medesimo altoparlante, in un circuito chiuso. L'effetto si innesca solitamente quando il microfono è troppo vicino all'altoparlante e capta una frequenza emessa da quest'ultimo, in un dato momento più forte delle altre, che quindi viene amplificata e riprodotta a sua volta con ampiezza via via crescente, virtualmente illimitata, se non fosse che l'amplificatore va in overdrive.

Bibliografia

- *M. Masoero, R. Furlan*: "Appunti di teoria - Caratteristiche ad applicazioni degli altoparlanti", Politecnico di Torino, 2008
- *U. Nicolao*: "Teoria dei sistemi di altoparlanti per il Sound Reinforcement: dal Subwoofer al Cluster", Milano, Editrice il Rostro, 1999
- *U. Nicolao*: "La caratterizzazione degli altoparlanti dinamici" Milano, Editrice il Rostro, 2003.
- *M. Hull*: "Amplificatori e altoparlanti Hi-Fi", Bologna, Edizioni C.E.L.I., 1973.

Il premio ICMT 2010 convergenza Media-driven assegnato alla Rai

Roma, 8 giugno 2010. In occasione della celebrazione della Giornata dell'Innovazione, la Rai riceve il "Premio dei premi" al Quirinale, dal Presidente della Repubblica Giorgio Napolitano. La motivazione è la vincita da parte di Rai del premio ICMT 2010 per la Convergenza Media Driven, premio istituito da Confindustria Servizi Innovativi e Tecnologici, per "l'approccio innovativo con cui viene affrontata la convergenza tra differenti tipologie di contenuto e per il contributo a un settore di rilevanza cruciale qual è quello dell'informazione".

A far vincere all'azienda il "Premio dei Premi" è Hyper Media News, la piattaforma Rai per l'aggregazione e pubblicazione multimodale di contenuti informativi, sviluppata al Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica tra il 2007 e il 2010 con la collaborazione della Direzione Rai Teche.

Con Hyper Media News la Rai si dota di una piattaforma estremamente flessibile e competitiva per l'organizzazione delle informazioni giornalistiche televisive e Internet, che renderà possibile la realizzazione di servizi innovativi per gli utenti delle piattaforme digitali e interattive.

Hyper Media News è infatti un sistema di rassegna stampa multimediale completamente automatico, basato sull'applicazione ed integrazione di tecnologie di analisi automatica del contenuto multimediale. Esso è in grado di organizzare notizie provenienti da sorgenti diverse come la televisione e il web e di fornire un accesso su base giornaliera ad un indice di argomenti ordinati per importanza.

Ciascun argomento, o dossier multimediale, è identificato da un titolo rappresentativo selezionato in maniera automatica dal sistema, da una tag cloud, e da informazioni relative alla tipologia e alla natura delle sorgenti.

Ciascun dossier multimediale è costituito da un insieme di elementi informativi eterogenei, ma accomunati dal tema della notizia, ed è navigabile in maniera indipendente cosicché l'utente del sistema ha la possibilità di fruire degli articoli web e delle notizie televisive in qualsiasi momento. Da praticamente qualsiasi punto dell'interazione è sempre possibile infatti navigare sui contenuti web, o sulle notizie televisive, che sono corredate dal testo trascritto dal sistema, anche questo automaticamente.

Ulteriori informazioni su Hyper Media News:

- *A. Messina, M. Montagnuolo, R. Borgotallo*: "Trattamento Automatico del Contenuto Audiovisivo per Servizi Innovativi di Informazione", Elettronica e Telecomunicazioni, Agosto 2009
- *A. Messina, M. Montagnuolo*: "A Generalised Cross-Modal Clustering Method Applied to Multimedia News Semantic Indexing and Retrieval", 18th International Conference on World Wide Web, Madrid, April 2009.

Assemblea Tecnica dell'EBU a Torino

Torino, 8-11 giugno - Si è tenuta a Torino l'Assemblea Tecnica dell'EBU/UER, la più grande associazione di enti radiotelevisivi pubblici. Promuove la cooperazione tra gli enti televisivi e facilita lo scambio dei contenuti audiovisivi (Eurovisione). Fondata nel 1950, compie quest'anno 60 anni. Ha sede a Ginevra. Comprende 75 membri attivi, di 56 paesi in Europa o confinanti e 43 membri associati nel resto del mondo.
Più di 120 direttori tecnici di tali enti hanno partecipato quest'anno all'Assemblea Tecnica per analizzare gli sviluppi tecnologici e le prospettive future per la produzione e la distribuzione dei programmi radiotelevisivi.
Sono passati circa vent'anni da quando la Rai ospitò, a Bologna, questo importante evento ed è significativo che la città ospitante sia oggi Torino: 80 anni fa in questa città venivano avviati i primi esperimenti di televisione nel "visorium" dell'E.I.A.R., in Via Arsenale, era il primo dei laboratori da cui trae origine l'attuale Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai, il cui direttore, l'ing. Alberto Morello ha presieduto l'Assemblea Tecnica.

Il programma si è sviluppato attraverso temi di grande attualità:

- ✓ la transizione al digitale terrestre e alla TV in alta definizione (HDTV)
- ✓ l'evoluzione di TV e radio con l'avvento delle reti a banda larga, per fornire programmi on-demand via internet
- ✓ le prospettive della TV 3D

L'Assemblea Tecnica ha eletto il nuovo Comitato Tecnico, formato da 13 membri, e Alberto Morello è stato rieletto per un secondo mandato biennale.

L'evento di chiusura dell'Assemblea, venerdì 11 giugno, è coinciso con la visione in diretta in 3D della partita inaugurale del campionato mondiale di calcio 2010 Sud Africa – Messico.
Anche in questo caso si può parlare di un anniversario emblematico: venti anni fa, sempre in una sala del Lingotto, veniva proiettato per la prima volta in assoluto un segnale HDTV codificato in digitale e trasmesso via satellite. Era la partita inaugurale di Italia '90 e la tecnologia utilizzata era stata sviluppata al Centro Ricerche Rai con il contributo determinante dell'industria italiana.
L'immagine e il ruolo di Torino, non solo come polo dell'innovazione tecnologica, ma anche come polo di attrazione culturale e turistica, sono stati ampiamente supportati e promossi dagli enti locali: Regione, Provincia e Comune.

La Medaglia d'Onore IEEE a Viterbi

Error Bounds for Convolutional Codes and an Asymptotically Optimum Decoding Algorithm

ANDREW J. VITERBI, SENIOR MEMBER, IEEE

Abstract—The probability of error in decoding an optimal convolutional code transmitted over a memoryless channel is bounded from above and below as a function of the constraint length of the code. For all but pathological channels the bounds are asymptotically (exponentially) tight for rates above R_0, the computational cutoff rate of sequential decoding. As a function of constraint length the performance of optimal convolutional codes is shown to be superior to that of block codes of the same length, the relative improvement increasing with rate. The upper bound is obtained for a specific probabilistic nonsequential decoding algorithm which is shown to be asymptotically optimum for rates above R_0 and whose performance bears certain similarities to that of sequential decoding algorithms.

Manuscript received May 20, 1966; revised November 14, 1966. The research for this work was sponsored by Applied Mathematics Division, Office of Aerospace Research, U. S. Air Force, Grant AFOSR-700-65.
The author is with the Department of Engineering, University of California, Los Angeles, Calif.

I. Summary of Results

SINCE Elias[1] first proposed the use of convolutional (tree) codes for the discrete memoryless channel, it has been conjectured that the performance of this class of codes is potentially superior to that of block codes of the same length. The first quantitative verification of this conjecture was due to Yudkin[2] who obtained

Montreal, 26 giugno - La prestigiosa IEEE Medal of Honor è stata consegnata a Andrew J. Viterbi per i suoi "contributi fondamentali alla tecnologia e alla teoria delle comunicazioni". Questo riconoscimento è, dal 1917, il più alto riconoscimento della IEEE, "la più ampia associazione a livello mondiale dedicata all'avanzamento dell'innovazione tecnologica e all'eccellenza a beneficio dell'umanità".

Andrew Viterbi è il secondo italiano a ricevere la Medaglia, il primo fu Guglielmo Marconi, nel 1920.

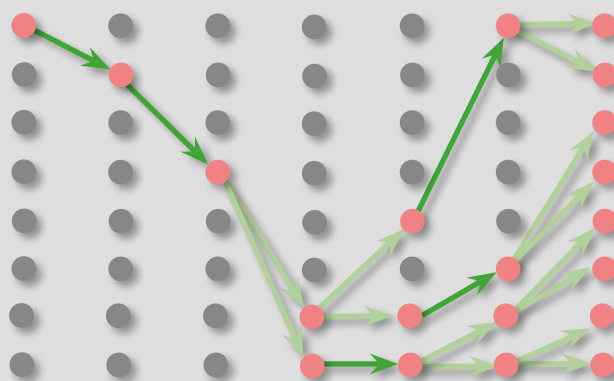
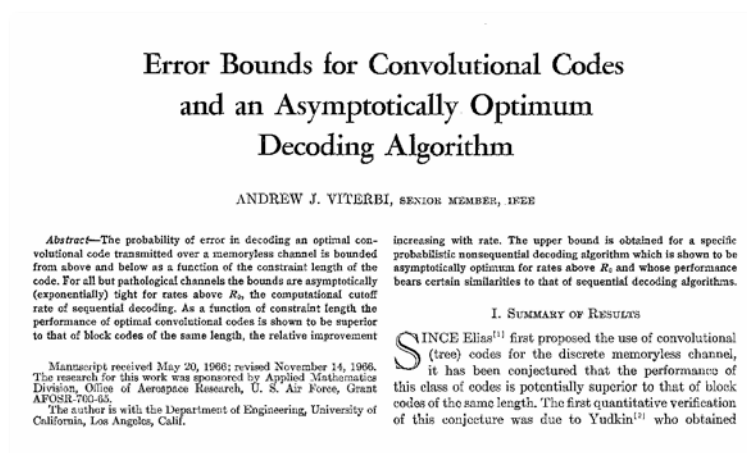
Andrea Viterbi nasce nel 1935 a Bergamo ed emigra nel 1939 con i genitori, a causa delle leggi razziali, negli Stati Uniti, dove il nome, al momento della naturalizzazione, diventa Andrew. Si laurea al MIT di Boston in ingegneria elettrica nel 1957. Dopo aver lavorato alla Raytheon, si trasferisce in California, al Jet Propulsion Laboratory, dove lavora per i sistemi di telemetria dei missili teleguidati. Nell'autunno del 1963, dopo aver acquisito il dottorato, insegna comunicazioni e teoria dell'informazione all'Università di Los Angeles.

Nel marzo 1966 semplifica l'algoritmo fino ad allora utilizzato per la decodifica dei codici convoluzionali: invece di operare successive iterazioni, il nuovo algoritmo, basato su una struttura a traliccio (*trellis*), considera i bit accanto a quello su cui di deve operare una decisione (è 0 oppure 1) ed effettua la scelta su base probabilistica. Il software opera una decisione sulla base di un numero limitato di stati, tipicamente da un minimo di 4 ad un massimo di 1000. L'articolo che riporta il nuovo algoritmo è pubblicato nel 1967 in *IEEE Transaction on Information Theory*.

Nel 1968 fonda la *Linkabit*, che, oltre a modem satellitari per applicazioni civili e militari, introduce uno scramber per la TV via cavo, utilizzato fino al 2008. Nel 1985 avvia una nuova impresa, la *Qualcomm* che si specializza nelle comunicazioni *spread-spectrum*, inizialmente per le comunicazioni da satellite e successivamente per la telefonia mobile.

Il CDMA (*Code-Division Multiple Access*) proposto dalla Qualcomm dal 1993 è parte degli standard per telefonia mobile 2G e 3G.

Lasciata la Qualcomm nel 2000, investe parte dei centinaia di milioni di dollari ricevuti come *stock option* nella società di investimento *Viterbi Group*, specializzata, ovviamente, in start-up nel campo delle comunicazioni.

Fra coloro hanno ricevuto la Medal of Honor, possiamo individuare, oltre a Viterbi, altri protagonisti della storia delle telecomunicazioni digitali e dei codici di protezione dagli errori, oggetto della serie di articoli che si conclude con quello pubblicato in questo numero: Harry Nyquist (1960), Claude E. Shannon (1966) e Robert G. Gallager (1990).

Nel traliccio, ciascun nodo corrisponde ad uno stato distinto ad uno specifico istante di tempo e ciascuna freccia rappresenta la transizione ad un nuovo stato successivo. L'algoritmo di Viterbi per la decodifica del flusso binario, codificato con codici convoluzionali, si basa sulla proprietà che il costo di un percorso lungo il traliccio può essere espresso come somma dei costi di transizione fra i nodi adiacenti nel tempo. Ad ogni passo è determinato il costo relativo alla transizione a ciascuno dei nodi successivi e solo i percorsi che hanno il costo minimo sopravvivono, gli altri sono eliminati.

80 anni fa

TELEVISIONE A COLORI

(articolo pubblicato sul Radiocorriere numero 33 del 16-23 agosto1930)

Schermo ruotante per la televisione a colori

Il principio degli usuali apparecchi di televisione (usuali per modo di dire, poiché non si può ancora parlare di impiego corrente di questa miracolosa applicazione) è forse in gran parte noto.
Chi conosce il principio della riproduzione zincografica delle immagini ombreggiate (*cliché* a mezza tinta, ha già facilitata la via nella comprensione del principio più in voga per la trasmissione delle immagini animate ed inanimate.
Il cliché di un giornale — parliamo del tipo più diffuso a reticolo — ha l'immagine costituita di punti equidistanti, più o meno marcati, che formano le zone più o meno scure della fotografia.
Nella televisione, con gli adattamenti speciali richiesti da una si particolare applicazione, resta sempre, come punto di partenza, la scomposizione delle immagini.
Il quadro da trasmettere (l'operazione ai svolge in un tempo che è compreso nei limiti della persistenza delle Immagini nel nostro occhio viene "esplorato" in tutta la sua superficie virtuale. Se si fissassero i vari punti su di una lastra sensibile si avrebbe qualche cosa di molto simile al *cliché*, con punti più o meno marcati a seconda della illuminazione meno o più viva dei punti stessi.
Come avvenga praticamente questa scomposizione è stato più volte detto e dall'egregio ingegnere Banfi è stato più volte chiaramente spiegato. Un disco rotante con una serie di orifizi scaglionati a spirale verso il bordo del disco (che è piatto) è in moto davanti alla figura in modo che la figura medesima viene scomposta in una serie di linee pressoché orizzontali. La cellula fotoelettrica riceve l'impressione, linea per linea e quindi punto per punto, dell'immagine esplorata con l'effetto di dare una corrente variabile in rapporto alle differenze di illuminazione dell'immagine stessa.
Il ricevitore ha un analogo sistema ma inverso e il funzionamento si basa — premessa la condizione essenziale del sincronismo di un disco uguale a quello del trasmettitore — sulla intensità luminosa di una sorgente locale.
Quadro per quadro è scomposto assai rapidamente nei suoi elementi luminosi e noi, sommariamente, abbiamo mostrato questa operazione come si direbbe per il cinematografo "al rallentatore".
Ogni giro del disco è un quadro; i quadri debbono succedersi, come insegna il cinematografo, in numero di almeno 16 al secondo. Il disco dovrà quindi avere una velocità superiore a 16 giri al minuto secondo, cosi come effettivamente avviene in pratica.
Sono necessari dei dispositivi delle immagini per assicurare il perfetto sincronismo del disco del ricevitore con quello del trasmettitore.
Questo dispositivo non tarderà molto ad entrare nell'uso dilettantistico: i primi esperimenti hanno già interessato il pubblico. E' anche opportuno frenare gli entusiasmi poiché il concetto del motto "televisione" è: vedere lontano ma non troppo. Non è opportuno, cioè, andar più lontano delle pratiche possibilità..

Ma noi non siamo qui per ornare la parola con l'esempio: parliamo infatti di televisione a colori.
Il sistema di cui abbiamo fatto sopra un rapidissimo cenno riproduce — possibilmente — la immagine monocromatica, come cioè la fotografia ed il cinema.
L'uomo, inquieto, non si accontenta della prima possibilità vista — od intravista — con la visione dei quadri animati lontani: vuole aggiungere sempre più naturalezza e verità a questa visione con i colori reali.
Qui affiora un vecchio principio noto anch'esso nell'arte della stampa, secondo cui tutti i colori naturali sono scomponibili (in varia dose) in tre colori fondamentali: rosso, giallo e turchino. Si sa che il verde si ha dal miscuglio del turchino e del giallo; turchino e rosso danno il viola; l'arancio è dato da giallo e rosso.
Perciò Baird, noto Inventore di dispositivi per televisione, ha recentemente tentato la televisione a colori.
L'ardito disco invece di avere una sola serie a spirale di fori, ha, il lettore avrà compreso, tre serie di fori a spirale. Ogni serie ha uno schermo polarizzato per un determinato colore fondamentale, cioè lascia passare solo i raggi rispettivamente rossi, gialli e turchini.
La sovrapposizione dei tre sistemi, i cui rispettivi colori formano tre quadri polarizzati per i colori fondamentali, costituisce il quadro con tutte le sue tinte e tutte le suo sfumature... almeno così, in teoria.
Il trasmettitore scompone la immagine negli elementi e nei tre colori fondamentali.
Il ricevitore ricompone, poiché il suo disco ha tre serie di fori con schermi colorati con i tre colori fondamentali, con una certa precisione tali elementi nel quadro finale.
Anche noi abbiamo scomposte ed analizzato in minuti elementi il più grande miracolo dell'ingegno umano. Lasciamo alla fantasia del lettore la ricomposizione...

O. BRUNO ANCELETTI.

50 anni fa
Elettronica 1960

ELETTRONICA

I . EDIZIONI RAI RADIOTELEVISIONE ITALIANA - ANNO IX - 1° TRIMESTRE - 1960 - NUMERO 1 - L. 300

ELETTRONICA

NUMERO 1 ANNO IX

GENNAIO MARZO 1960

DA PAGINA 1 A PAGINA 48

RIVISTA TRIMESTRALE

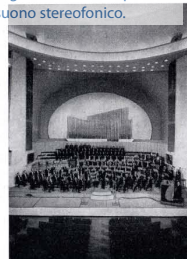
DIRETTORI:
EDOARDO CRISTOFARO
VITTORIO MALINVERNI

VICE DIRETTORE TECNICO:
GIUSEPPE DILDA

DIREZIONE E AMMINISTRAZIONE:
TORINO
VIA ARSENALE 21 - TELEF. 57-57

Concessionaria esclusiva della pubblicità:
COMPAGNIA INTERNAZIONALE PUBBLICITÀ PERIODICI (CIPP)
MILANO, VIA PISONI 2 - TEL. 652-814/15/16
TORINO, VIA POMBA 20 - TELEF. 57-57

Sommario:

L'Auditorium di Torino della RAI, dal quale vengono effettuate riprese di suono stereofonico.

L'Auditorium di Torino della RAI, dal quale vengono effettuate prese di suono stereofonico.

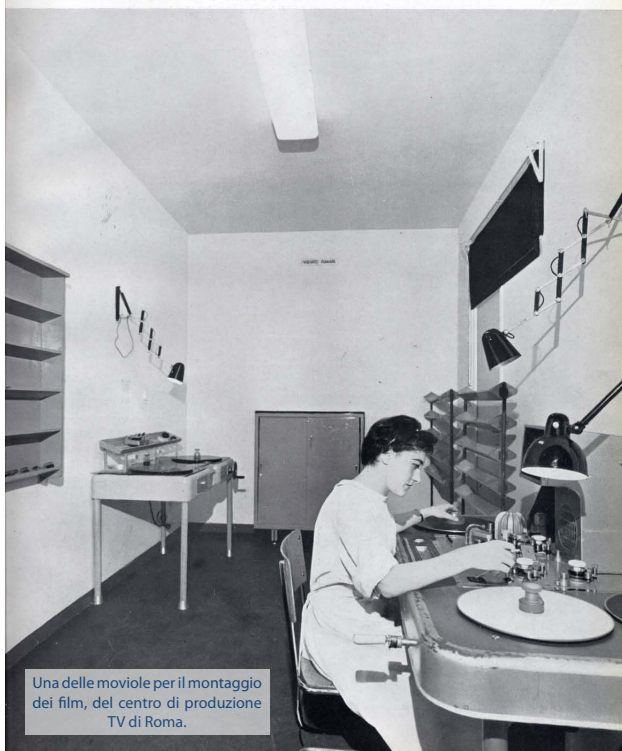
ERI . EDIZIONI RAI RADIOTELEVISIONE ITALIANA

IL PRESENTE NUMERO DI "ELETTRONICA,, COSTA IN ITALIA LIRE 300 (ARRETRATI LIRE 400) — I VERSAMENTI POSSONO ESSERE FATTI SUL CONTO CORRENTE POSTALE N. 2/37800
ALL'ESTERO LIRE 500 (ARRETRATI LIRE 600)
ABBONAMENTO ANNUALE: IN ITALIA LIRE 1000 - ALL'ESTERO L. 1600
SPEDIZIONE IN ABBONAMENTO POSTALE - IV GRUPPO
REGISTRATO ALLA CANCELLERIA DEL TRIBUNALE C. P. DI TORINO AL N. 493 IN DATA 6-11-1951

ELETTRONICA

I . EDIZIONI RAI RADIOTELEVISIONE ITALIANA - ANNO IX - 2° TRIMESTRE - 1960 - NUMERO 2 - L. 300

Una delle moviole per il montaggio dei film, del centro di produzione TV di Roma.

ELETTRONICA

NUMERO 2 ANNO IX

APRILE GIUGNO 1960

DA PAGINA 49 A PAGINA 88

RIVISTA TRIMESTRALE

DIRETTORI:
EDOARDO CRISTOFARO
VITTORIO MALINVERNI

VICE DIRETTORE TECNICO:
GIUSEPPE DILDA

DIREZIONE E AMMINISTRAZIONE:
TORINO
VIA ARSENALE 21 - TELEF. 57-57

Concessionaria esclusiva della pubblicità:
COMPAGNIA INTERNAZIONALE PUBBLICITÀ PERIODICI (CIPP)
MILANO, VIA PISONI 2 - TEL. 652-814/15/16
TORINO, VIA POMBA 20 - TELEF. 57-57

Sommario.

Una delle moviole per il montaggio dei film, del centro di produzione TV di Roma.

ERI . EDIZIONI RAI RADIOTELEVISIONE ITALIANA

IL PRESENTE NUMERO DI "ELETTRONICA,, COSTA IN ITALIA LIRE 300 (ARRETRATI LIRE 400) — I VERSAMENTI POSSONO ESSERE FATTI SUL CONTO CORRENTE POSTALE N. 2/37800
ALL'ESTERO LIRE 500 (ARRETRATI LIRE 600)
ABBONAMENTO ANNUALE: IN ITALIA LIRE 1000 - ALL'ESTERO L. 1600
SPEDIZIONE IN ABBONAMENTO POSTALE - IV GRUPPO
REGISTRATO ALLA CANCELLERIA DEL TRIBUNALE C. P. DI TORINO AL N. 493 IN DATA 6-11-1951

Centro di Produzione TV di Roma, della RAI. Sala registrazione di un complesso di sincronizzazione.

ELETTRONICA

NUMERO 3 ANNO IX
LUGLIO SETTEMBRE 1960
DA PAGINA 89 A PAGINA 136

RIVISTA TRIMESTRALE
DIRETTORI:
EDOARDO CRISTOFARO
VITTORIO MALINVERNI
VICE DIRETTORE TECNICO:
GIUSEPPE DILDA
DIREZIONE E AMMINISTRAZIONE:
TORINO
VIA ARSENALE 21 - TELEF. 57-57
Concessionaria esclusiva della pubblicità:
COMPAGNIA INTERNAZIONALE PUBBLICITÀ PERIODICI (CIPP)
MILANO, VIA PISONI 2 - TEL. 652-814/15/16
TORINO, VIA POMBA 20 - TELEF. 57-57

Sommario:

Centro di Produzione TV di Roma, della RAI. Sala registrazione di un complesso di sincronizzazione.

ERI EDIZIONI RAI RADIOTELEVISIONE ITALIANA

IL PRESENTE NUMERO DI "ELETTRONICA" COSTA IN ITALIA LIRE 300 (ARRETRATI LIRE 400) — I VERSAMENTI POSSONO ESSERE FATTI SUL CONTO CORRENTE POSTALE N. 2/37800
ALL'ESTERO LIRE 500 (ARRETRATI LIRE 600)
ABBONAMENTO ANNUALE: IN ITALIA LIRE 1000 - ALL'ESTERO L. 1600
SPEDIZIONE IN ABBONAMENTO POSTALE - IV GRUPPO
REGISTRATO ALLA CANCELLERIA DEL TRIBUNALE C. P. DI TORINO AL N. 493 IN DATA 6-11-1951

La copertina mostra una vista frontale di un'antenna U.H.F. realizzata con elementi radianti a fessura, studiata e realizzata nel Laboratorio Ricerche della RAI in occasione della prossima entrata in funzione dei primi impianti destinati ad irradiare il secondo programma televisivo. La struttura d'insieme viene descritta nel presente numero.

ELETTRONICA

NUMERO 4 ANNO IX
OTTOBRE DICEMBRE 1960
DA PAGINA 137 A PAGINA 184

RIVISTA TRIMESTRALE
DIRETTORI:
EDOARDO CRISTOFARO
VITTORIO MALINVERNI
VICE DIRETTORE TECNICO:
GIUSEPPE DILDA
DIREZIONE E AMMINISTRAZIONE:
TORINO
VIA ARSENALE 21 - TELEF. 57-57
Concessionaria esclusiva della pubblicità:
COMPAGNIA INTERNAZIONALE PUBBLICITÀ PERIODICI (CIPP)
MILANO, VIA PISONI 2 - TEL. 652-814/15/16
TORINO, VIA BERTOLA 34 - TELEF. 512-522

Sommario:

La copertina mostra una vista frontale di un'antenna U.H.F. realizzata con elementi radianti a fessura, studiata e realizzata nel Laboratorio Ricerche della RAI in occasione della prossima entrata in funzione dei primi impianti destinati ad irradiare il secondo programma televisivo. La struttura d'insieme viene descritta nel presente numero.

ERI EDIZIONI RAI RADIOTELEVISIONE ITALIANA

IL PRESENTE NUMERO DI "ELETTRONICA" COSTA IN ITALIA LIRE 300 (ARRETRATI LIRE 400) — I VERSAMENTI POSSONO ESSERE FATTI SUL CONTO CORRENTE POSTALE N. 2/37800
ALL'ESTERO LIRE 500 (ARRETRATI LIRE 600)
ABBONAMENTO ANNUALE: IN ITALIA LIRE 1000 - ALL'ESTERO L. 1600
SPEDIZIONE IN ABBONAMENTO POSTALE - IV GRUPPO
REGISTRATO ALLA CANCELLERIA DEL TRIBUNALE C. P. DI TORINO AL N. 493 IN DATA 6-11-1951

In memoriam

United States Patent [19]
Cucchi et al.

[11] **Patent Number:** 4,970,590
[45] **Date of Patent:** Nov. 13, 1990

[54] SYSTEM AND DEVICE FOR PACKAGE MULTIPLEXING IN TRANSMISSION OF MANY DATA FLOWS GENERATED BY A SOLE ALGORITHM

[75] Inventors: Silvio Cucchi, Gaggiano; Marzio Barbero, Turin, both of Italy

[73] Assignee: Telettra - Telefonia Elettronica e Radio, Italy

[21] Appl. No.: 454,682

[22] Filed: Dec. 21, 1989

[30] Foreign Application Priority Data

Dec. 21, 1988 [IT] Italy 23036 A/88

[51] Int. Cl.[5] H04N 7/04; H04N 7/08; H04N 7/13

[52] U.S. Cl. 358/133; 358/141

[58] Field of Search 358/133, 141

[56] References Cited

U.S. PATENT DOCUMENTS

4,914,515 4/1990 Van Lynt 358/141

Primary Examiner—Howard W. Britton
Attorney, Agent, or Firm—Ostrolenk, Faber, Gerb & Soffen

[57] ABSTRACT

A system for transmission of signals coming from a source and processed by an algorithm that, to minimize data (values+parameters), generates values that are encoded, for example, with variable length. The data flows generated by the algorithm are each ordered in packages with the addition of information of source, of frame and of management before being multiplexed.

3 Claims, 2 Drawing Sheets

Gli articoli di Elettronica e Telecomunicazioni spesso rievocano le prime trasmissioni di immagini in alta definizione con tecniche digitali, avvenute 20 anni fa, in occasione dei campionati mondiali di calcio Italia '90.

Un evento che ebbe una grande risonanza e che definitivamente sancì il passaggio dalle tecniche analogiche a quelle digitali nel campo della diffusione televisiva.

Tale realizzazione fu dovuta al contributo di molte persone, ma senz'altro un ruolo essenziale fu quello dell'ing. Silvio Cucchi, allora responsabile del team che progettò in Telettra il sistema. Purtroppo Silvio è mancato all'inizio di quest'anno, a 62 anni.

Ci rimangono di lui, a testimonianza, le decine di brevetti (alcuni hanno un ruolo importante nei sistemi MPEG, che tutti oggi utilizziamo), articoli e realizzazioni, il ricordo della sua eccezionale cultura scientifica, tecnica e realizzativa (trasformava immediatamente le sue intuizioni in percorsi tracciati nel silicio), ma anche della sua cultura umanistica e, soprattutto, della sua umanità.